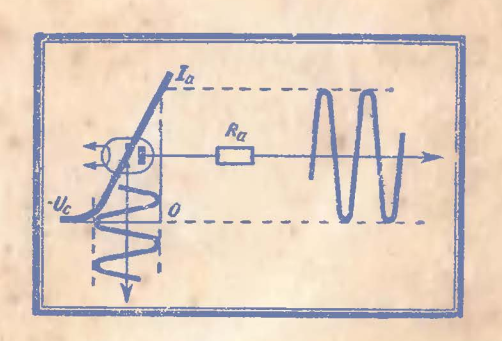
МАССОВАЯ РАДИО-БИБЛИОТЕКА

Р. М. МАЛИНИН

УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ



Госэнергоиздат

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 183

Р. М. МАЛИНИН

УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1953 ЛЕНИНГРАД

Книга предназначается для радиолюбителей, самостоятельно конструирующих и изготовляющих усилители низкой частоты и радиовещательные приемники. В ней излагаются принципы действия усилителей низкой частоты, собранных по различным встречающимся на практике схемам и работающих в различных режимах, рассматриваются методы оценки качественных показателей таких усилителей, даются элементарные их расчеты.

СОДЕРЖАНИЕ

Редактор *В. Г. Машарова* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 31/XII 1952 г. Подписано к печати 20/VI 1953 г.
Бумага $84\times108^1/_{32}=2^3/_8$ бумажных — 7,79 п. л. Уч.-изд. л. 8,6
Т-05213 Тираж 25 000 Цена 3 р. 45 к. Зак. № 114

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

ПРЕДИСЛОВИЕ

Директивы XIX съезда Коммунистической партии Советского Союза по пятому пятилетнему плану развития СССР предусматривают дальнейший рост средств радиосвязи и радиовещания. Намечается значительное увеличение мощности радиовещательных станций, развертывание работ по внедрению радиовещания на ультракоротких волнах, радиорелейной связи, дальнейшее развитие телевидения.

Для выполнения этих важных задач необходим дальнейший рост кадров отечественных радиоспециалистов, могучим резервом которых является радиолюбительство. Из среды радиолюбителей вышли многие наши ученые, радиоинженеры, изобретатели и рационализаторы в области радиотехники, обеспечившие советской науке и радиотехнике ведущее место в мире и продолжающие повседневно вносить ценные вклады в дело развития науки и радиотехники, в дело радиофикации страны социализма.

Многие радиоспециалисты, вышедшие из радиолюбителей, за свои работы удостоены Сталинских премий.

Коммунистическая партия и Советское правительство уделяют большое внимание радиолюбительскому движению в Советском Союзе. Возглавляет это движение Всесоюзное добровольное общество содействия армии, авиации и флоту. Для радиолюбителей издается большое количество литературы.

Данная книга предназначена для широкого круга радиолюбителей. Она может быть использована также как учебное пособие в очных и заочных учебных заведениях, готовящих радиомонтеров, надсмотрщиков радиоаппаратуры и работников других радиоспециальностей.

Основное внимание в книге уделено изложению происходящих в ламповых усилителях низкой частоты физических процессов и описанию схем усилителей, используемых в технике радиовещания, поскольку эта область применения

усилителей является наиболее широкой и интересует наибольшее число радиолюбителей.

В нее введены несложные, доступные для радиолюбителей средней квалификации расчеты усилителей низкой частоты и их элементов, а также ряд данных, которые могут быть полезны радиолюбителям-конструкторам.

Необходимо отметить, что рассмотрение всех разновидностей схем, применяемых в современной низкочастотной аппаратуре, является делом неосуществимым в объеме этой книги. Поэтому автор вынужден был ограничиться описанием только основных схем усиления, отрицательной обратной связи, регулировок громкости, тембра и т. п., на основе которых создаются все многообразные их варианты. Изучив эти основные принципиальные схемы и происходящие в них физические процессы, радиолюбитель сможет ориентироваться в конкретных конструкциях усилителей низкой частоты и низкочастотных частях приемников.

Р. Малинин

1. ПРИМЕНЕНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Колебания низкой частоты. Звуковыми колебаниями или колебаниями звуковой частоты называются колебания с частотами примерно от 20—30 до 16 000—20 000 *гц*. К электрическим колебаниям звуковой или низкой частоты относятся переменные напряжения и токи, величины которых периодически изменяются с такими же частотами. Эти колебания с помощью телефонной трубки или громкоговорителя могут быть преобразованы в звуковые колебания воздуха тех же частот восприняты ухом как звук.

При радиопередаче звуковые колебания, создаваемые голосом диктора, артиста или музыкальными инструментами, преобразуются с помощью микрофона в электрические колебания низкой частоты. Радиоволны доносят их до радиоприемника, в котором снова образуются электрические колебания низкой частоты, преобразуемые телефонной трубкой или громкоговорителем в звуковые колебания.

Усилитель низкой частоты. Усилителем низкой частоты называется устройство, в котором за счет расходования электроэнергии от батарей, выпрямителя или иного источника электрического тока, питающего усилитель, из относительно слабых электрических колебаний низкой (звуковой) частоты получаются более мощные электрические колебания. Усиление, как правило, осуществляется с помощью электронных ламп — триодов, пентодов или лучевых тетродов.

Способ усиления слабых электрических колебаний с помощью электронных ламп изобретен известным советским ученым профессором В. И. Коваленковым, учеником изобретателя радио А. С. Попова. Первые усилители с трехэлектродными лампами он построил еще в 1910 г. Многие современные усилители по своему устройству гораздо сложнее, чем эти первые усилители, однако их действие основано на способе, предложенном В. И. Коваленковым.

Большой вклад в развитие и усовершенствование техники усиления низкой частоты сделали советские ученые и радиоспециалисты И. Е. Горон, Г. С. Цыкин, А. А. Николаев, М. С. Орлов и многие другие.

Усилители низкой частоты в наше время нашли весьма широкое применение. Они необходимы в радиоприемниках, в аппаратной при радиостудии, откуда ведется радиопередача, на радиовещательной станции, на радиотрансляционном узле, для усиления речей ораторов, выступающих перед большими аудиториями, в звуковом кино, на междугородних телефонных станциях, в диспетчерских установках на транспорте и на промышленных предприятиях, а также во многих других областях народного хозяйства.

Усилители н. ч.* в радиоприемнике. Электрические колебания н. ч., получаемые после детектора приемника, не являются достаточно мощными для нормальной работы громкоговорителя. Поэтому напряжения н. ч. от детектора приемника подаются на громкоговоритель через усилитель н. ч.

Многие радиоприемники устроены таким образом, что их усилители н. ч. могут быть использованы для воспроизведения через громкоговоритель записей на граммофонных пластинках с помощью звукоснимателей.

Усилители н. ч. на радиовещательных узлах и станциях. Слабые электрические колебания н. ч., выработанные микрофоном, установленным в радиостудии или другом месте, откуда ведется радиопередача, поступают на усилитель н. ч. радиоаппаратной, усиливаются последним и направляются по проводной трансляционной линии на радиовещательную станцию, где имеется свой усилитель н. ч., который опять усиливает полученные колебания н. ч. и подает их на радиопередатчик.

Усилители н. ч. на радиотрансляционных узлах и для усиления речей. Сигналы радиовещательной станции, принятые радиотрансляционным узлом и предварительно усиленные его радиоприемником, поступают на специальный усилитель н. ч., увеличивающий мощность полученных колебаний н. ч. до величины, обеспечивающей нормальную слышимость на абонентских точках, соединенных проводами с усилителем радиотрансляционного узла. Когда радиотрансляционный узел ведет местную передачу, колебания

---

* В дальнейшем вместо слов „низкой частоты" мы будем писать сокращенно „н. ч.".

н. ч. с микрофона, граммофонного звукоснимателя или магнитофона поступают на тот же усилитель и далее усиливаются и распределяются между абонентскими точками так же, как и при трансляции радиопередачи.

Схемы диспетчеризации с применением усилителей н. ч. и громкоговорителей подобны схеме, используемой при местной передаче с радиотрансляционного узла.

Схема применения усилителя н. ч. при усилении речей почти такая же, как и при местной передаче с радиотрансляционного узла, только микрофон устанавливается в том же помещении (зале, аудитории) или на той же площади (стадионе и т. п.), где и громкоговорители. В этих случаях применяются более мощные громкоговорители.

Первые громкоговорящие установки для обслуживания больших площадей были созданы уже в первые годы Советской власти на Казанской базе радиоинформирований. Когда Владимир Ильич Ленин узнал об этих работах, он поручил установить громкоговорящие устройства в Москве. В 1921 г. усилители с громкоговорителями были доставлены в Москву. Вначале громкоговорители были расположены на Советской площади (на балконе здания Московского Совета). Опытные передачи через эти громкоговорители (чтение книг) велись по проводам с Московской центральной телефонной станции и были отчетливо слышны на противоположном конце площади.

Ко дню открытия 3-го Конгресса Коминтерна — 17 июня 1921 г. были установлены громкоговорители на площадях: Свердлова, Добрынинской, Серпуховской, Бауманской, у Крестьянской заставы и на Девичьем поле. Передача к ним подавалась по телефонным проводам. С этого дня через эти громкоговорители москвичи регулярно в вечернее время слушали передачу «Устной газеты РОСТА» (Российского телеграфного агенства). Кроме газетных сообщений через эти установки нередко передавались доклады и популярные лекции. Все эти передачи пользовались огромным успехом у москвичей. Так начал свою работу один из первых радиотрансляционных узлов.

В 1925 г. Московским губернским советом профессиональных союзов под руководством инж. А. В. Виноградова был построен радиотрансляционный узел со специальной проводной сетью, по которой началась трансляция радиопередач сначала в заводские клубы Москвы, а затем и в квартиры трудящихся. В следующем году трансляция радиопередач по проводам получила развитие в Ленинграде

и многих других городах Советского Союза. К началу Великой Отечественной войны в городах и селах нашей Родины работали уже тысячи радиотрансляционных узлов, к которым были подключены миллионы громкоговорителей (радиоточек). За истекшие послевоенные годы количество радиотрансляционных узлов и радиоточек еще увеличилось и продолжает расти дальше.

Усилители для дальней телефонной связи. Современная дальняя телефонная связь по проводам немыслима без применения усилителей н. ч. При передаче по длинным линиям колебания н. ч., созданные микрофоном телефонного аппарата, настолько ослабляются, что делаются неслышными в телефонной трубке, включенной к другому концу линии. Включением в междугородние телефонные линии так называемых телефонных трансляций, основными частями которых являются усилители н. ч., осуществляется надежная телефонная связь между городами и другими населенными пунктами, отстоящими друг от друга на тысячи километров. Телефонные трансляции также изобретены В. И. Коваленковым.

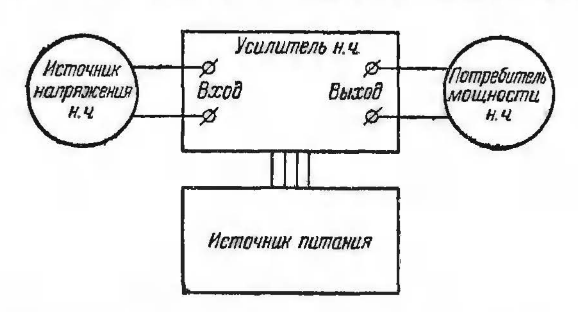
Усилители н. ч. для звукозаписи. При звукозаписи колебания от микрофона или радиоприемника усиливаются усилителем н. ч. и поступают на звукозаписывающую головку магнитофона или рекордер (при записи на диск). Звукозаписывающая головка намагничивает движущуюся пленку, содержащую в себе частицы железа, а рекордер вырезает на поверхности диска спиральную бороздку, представляющую собой графическое изображение электрических колебаний, подведенных к рекордеру.

При воспроизведении магнитной звукозаписи пленка проходит через звуковоспроизводящую головку, которая при этом создает слабые электрические колебания н. ч. При воспроизведении записи с диска (с граммофонной пластинки) игла звукоснимателя передвигается по бороздке диска и звукосниматель также создает слабые электрические колебания н. ч. В обоих случаях эти колебания поступают на громкоговоритель после усиления.

В звуковом кино луч света от электрической лампочки проходит сквозь «звуковую дорожку» кинопленки, движущейся через аппарат. В результате световой луч модулируется с частотами звука, записанного на пленку, и попадая на фотоэлемент, преобразуется в электрические колебания н. ч. Чтобы получить нормальное звучание громкоговорителей в зале кино, эти колебания подвергаются усилению с помощью усилителя н. ч.

2. УСИЛЕНИЕ И ВЫХОДНАЯ МОЩНОСТЬ

Вход и выход усилителя. Усилитель можно рассматривать со стороны входа как потребитель относительно небольшой энергии, получаемой от источника входного напряжения, т. е. как нагрузку этого источника, а со стороны выхода — как источник большей энергии, которую усилитель отдает выходной нагрузке (фиг. 1). При этом обязательным условием получения энергии на выходе усилителя



Фиг. 1. Скелетная схема включения усилителя низкой частоты.

является подача энергии на его вход. Следовательно, усилитель представляет собой источник энергии с посторонним возбуждением.

Входное сопротивление. Для переменного тока н. ч., идущего на усилитель от источника входного напряжения, усилитель представляет собой некоторое сопротивление (между входными зажимами или гнездами усилителя). Это сопротивление носит название *входного сопротивления* усилителя.

Входное сопротивление усилителя зависит от частоты электрического напряжения, подведенного к входу усилителя. Происходит это потому, что во входных цепях всякого усилителя, как правило, есть различные реактивные сопротивления, которые, как известно, изменяются от изменения частоты переменного тока. В паспортных данных усилителя указывается среднее входное сопротивление в омах для всех частот, которые он должен усиливать. К его величине обычно добавляют еще величину допуска в процентах, на которую может отклоняться величина входного сопротивления при различных частотах.

Очевидно, что от величины входного сопротивления усилителя н. ч, зависит ток, который проходит через него от

источника входного напряжения, а следовательно, и мощность, расходуемая от последнего.

Величина входного сопротивления усилителя н. ч. должна быть согласована с внутренним сопротивлением источника входного напряжения. Часто требуется, чтобы входное сопротивление усилителя н. ч. было достаточно большим — порядка мегома или десятых долей мегома. Это необходимо, в частности, когда источником входного напряжения усилителя н. ч. является диодный детектор или пьезоэлектрический звукосниматель. Последние обладают значительными внутренними сопротивлениями, и чтобы по возможности меньшая часть создаваемой ими э. д. с. терялась на их внутреннем сопротивлении, а большая часть попадала на вход усилителя, необходимо, чтобы входное сопротивление последнего было большим.

Выходное сопротивление усилителя. Рассматривая усилитель н. ч. со стороны его выхода, т. е. как источник энергии колебаний н. ч., можно ввести понятие *выходного сопротивления* усилителя, которое аналогично внутреннему сопротивлению источника электроэнергии. Величина выходного сопротивления может быть также различной для разных частот.

Выходная мощность и входное напряжение. К обычным источникам электроэнергии, применяемым в электротехнике, как правило, предъявляется требование, чтобы создаваемые ими напряжения были по возможности неизменными. Иначе ведут себя источники входного напряжения усилителей н. ч. Вырабатываемые ими напряжения непрерывно изменяются по амплитуде и частоте. При передаче негромкого разговора, тихой игры на музыкальных инструментах входное напряжение получается меньше, чем, например, при выкриках и громкой игре оркестра. Соответственно в различные моменты времени получаются и различные мощности электрических колебаний н. ч. на выходе усилителя. Это и позволяет нам при слушании передачи одни звуки воспринимать как более сильные, а другие — как более слабые.

Усилители н. ч. принято характеризовать: 1) *номинальной выходной* мощностью — наибольшей мощностью, которую можно получить на его выходе при самой громкой передаче *, и 2) *номинальным входным напряжением* — на-

---

* Государственный общесоюзный стандарт на радиовещательные приемники (ГОСТ 5651-51) устанавливает следующие номинальные выходные мощности приемников с питанием от электросети; для радио-

пряжением н. ч., которое нужно подвести к входу усилителя, чтобы обеспечить номинальную выходную мощность. Для сокращения письма и произношения обычно пишут и говорят «выходная мощность» и «входное напряжение», имея при этом в виду их номинальные значения. При радиотелефонном приеме напряжения и мощности большую часть времени бывают меньше номинальных величин, достигая их на сравнительно короткие промежутки времени.

В некоторых случаях указывают также выходное напряжение, имея в виду напряжение на выходе усилителя, которое получается при номинальной выходной мощности.

Подводить к входу усилителя напряжение больше указанного в его паспорте (или установленного расчетом) или, как говорят, «перегружать вход усилителя» не следует, так как в этих условиях передача на выходе усилителя будет искаженной.

Оптимальное нагрузочное сопротивление. Условием получения на выходе усилителя наибольшей мощности является также включение на его выход некоторого определенного так называемого *оптимального* для него *сопротивления нагрузки*. Если изменить величину сопротивления нагрузки в сторону увеличения или уменьшения от оптимальной, то мощность, отдаваемая усилителем, может уменьшиться. При испытании усилителя на заводе снимают его *нагрузочную характеристику*, показывающую зависимость мощности, которую может отдать усилитель на выходе от величины нагрузочного сопротивления. Для снятия такой характеристики к выходу усилителя присоединяют переменное сопротивление, практически не обладающее индуктивностью и емкостью, а на вход усилителя от звукового генератора подают напряжение определенной низкой частоты (обычно 400, 800 или 1 000 *гц*) с неизменной во время измерения амплитудой. В процессе снятия характеристики изменяют величину сопротивления и после каждого изменения произ-

---

приемников 1-го класса — 4 *вт*, 2-го класса — 1,5 *вт* и 3-го класса — 0,5 *вт*. Для приемников 2-го класса с батарейным питанием установлена выходная мощность 0,15 *вт*, определяемая экономической трудностью получить бо́льшую мощность при этом способе питания. Эти цифры можно положить в основу и при самостоятельном конструировании усилителей н. ч. радиовещательных приемников.

Указанные мощности определяются заданными ГОСТ средними звуковыми давлениями, которые должны создавать громкоговорители этих приемников: 20, 10 и 4,5 бара соответственно для сетевых приемников 1-го, 2-го и 3-го классов и 3 бара для батарейных приемников 2-го и 3-го классов.

водят измерение получающейся на нем мощности. По полученным результатам строят кривую, которая и представляет собой нагрузочную характеристику данного усилителя.

Выше отмечалось, что подача на вход усилителя чрезмерно большого напряжения приводит к так называемой перегрузке входа усилителя. Если нагрузка будет иметь меньшее сопротивление, чем оптимальное, то получится *перегрузка выхода* усилителя. При этом выходное напряжение и мощность, отдаваемая усилителем, уменьшаются.

«Сброс» нагрузки. Особым случаем является так называемый «сброс нагрузки», т. е. отключение ее от усилителя. Этот случай аналогичен режиму холостого хода источника электрического тока. При этом усилитель не отдает на выходе никакой мощности; в то же время напряжение на выходе в большей или меньшей степени возрастает по сравнению с нормальным для нагруженного усилителя.

Коэффициент усиления. Усилитель можно также охарактеризовать *коэффициентом усиления* (сокращенно говорят усилением), который показывает, во сколько раз напряжение или мощность на выходе усилителя больше напряжения или мощности на его входе. Соответственно различают усиление (коэффициент усиления) по напряжению и усиление (коэффициент усиления) по мощности *. Умножив напряжение или мощность на входе усилителя на его коэффициент усиления по напряжению или мощности, получим напряжение или мощность на выходе усилителя.

Очевидно, чем меньшее напряжение или меньшую мощность дает источник входного напряжения и чем больше напряжение и большую мощность требует потребитель (или потребители), тем больше должен быть коэффициент усиления усилителя.

Как увидим ниже, усилитель не совсем одинаково усиливает напряжения и мощности различных частот, т. е. при различных частотах получаются различные коэффициенты усиления. В паспортных данных усилителей поэтому обычно приводятся коэффициенты усиления с одновременным указанием, при какой частоте они имеют место (обычно 400, 800 или 1 000 *гц*).

Децибелы. В технике усиления низкой частоты широко применяется способ оценки усиления, а также ослабления

---

* В дальнейшем, говоря о коэффициенте усиления, будем подразумевать коэффициент усиления по напряжению, если в каждом отдельном случае не будет оговорок, что разговор идет о коэффициенте усиления по мощности.

сигналов в особых единицах — *децибелах*. Для лучшего уяснения сущности этого способа оценки, вспомним некоторые сведения о звуке.

Для того чтобы мы услышали звук, воздушные звуковые волны должны создавать достаточное давление на барабанную перепонку нашего уха.

Наименьшее звуковое давление, при котором ухо начинает слышать звук, называется «порогом чувствительности уха». При частотах 1 000—5 000 *гц* порог чувствительности уха у разных людей составляет примерно от 0,0002 до 0,0005 бар *. При более высоких и более низких частотах, где чувствительность уха меньше, звук может быть услышан только при бóльших звуковых давлениях.

Когда же звуковое давление на барабанные перепонки очень велико, то в ушах ощущается боль. При частотах 1 000—5 000 *гц* болевое ощущение получается, когда звуковое давление превышает по величине 1 000 *бар*. При более низких или более высоких частотах болевое ощущение возникает при меньших звуковых давлениях.

Разговорная речь при нормальной ее громкости создает в среднем звуковое давление, равное приблизительно одному бару.

Увеличение или уменьшение ощущения громкости находится не в прямой зависимости от звукового давления, а пропорционально приблизительно логарифму отношения сравниваемых звуковых давлений. В соответствии с этой зависимостью в практику и введена единица изменения ощущения громкости, носящая название децибела (сокращенное обозначение *дб*). Изменение ощущения громкости в децибелах может быть вычислено по формуле

$$S = 20 \lg \frac{P}{P_0}, \qquad (1)$$

где P и P_0 — сравниваемые величины звуковых давлений, или найдено по графику фиг. 2.

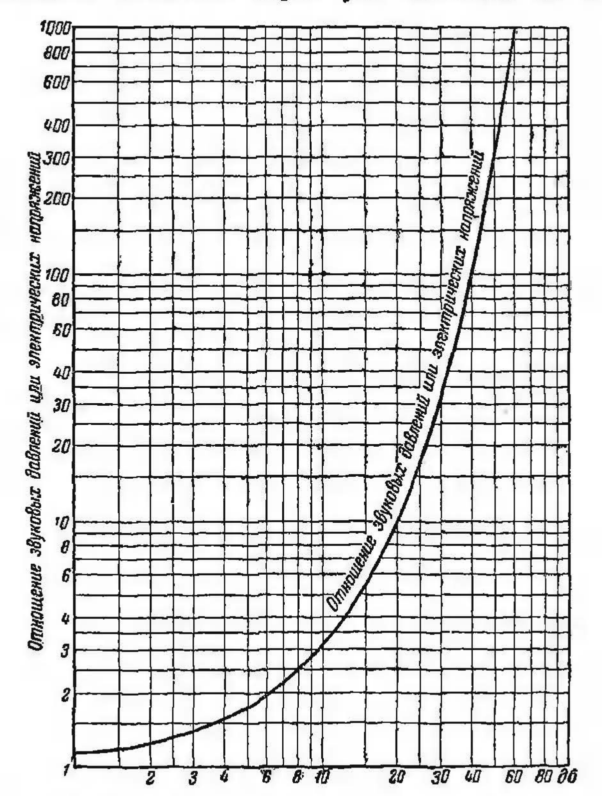
Один децибел соответствует изменению звукового давления в 1,12 раза, или на 12%. Когда мы слушаем чистый синусоидальный тон средней частоты **, наше ухо может

---

* Бар — единица давления. Если на каждый квадратный сантиметр какой-либо поверхности действует сила в одну дину, то давление, производимое на эту поверхность, равно одному бару.

** Все частоты, относящиеся к числу низких, принято разделять на три подгруппы: нижние, средние и верхние. К средним мы будем относить частоты примерно от 300 — 400 до 2 000 — 3 000 *гц*, к нижним — ча-

отметить изменение в громкости его звучания только в том случае, если это изменение превышает указанную величину. При передаче сложного звука ухо человека не ощущает



Фиг. 2. График для определения отношений звуковых давлений и напряжений в децибелах.

изменения звукового давления даже в значительно большее число раз.

стоты более низкие, а к верхним — частоты более высокие. Такое разделение низких частот определяется некоторыми особенностями восприятия каждой из этих подгрупп частот, а также некоторыми особенностями их прохождения через усилители и. ч. Наряду с этим мы будем применять термины „низшие частоты" и „высшие частоты", подразумевая под ними соответственно самые низкие и самые высокие (граничные) частоты полосы пропускания усилителей низкой частоты, т. е. частоты, находящиеся на границах (краях) данной полосы или в непосредственной близости к этим границам.

Уровень громкости звука в децибелах. Если принять некоторую громкость за начальную (нулевую), то можно пользоваться децибелами не только для сравнения между собой различных по величине ощущений громкости, но и создать шкалу, по которой можно оценивать величины ощущения громкости различных звуков по сравнению с этой нулевой (начальной) громкостью. В качестве нулевой громкости обычно принимается порог слышимости. Ввиду того что он различен на различных частотах, принят условный так называемый «стандартный порог слышимости», соответствующий звуковому давлению 0,0002 бара при частоте 1 000 *гц*.

Любая величина звукового давления P может быть пересчитана в децибелы по формуле

$$S_0 = 20 \lg \frac{P}{0{,}0002}, \quad \text{или} \quad S_0 = 20 \lg 5\,000 P. \qquad (2)$$

Зависимость между напряжением питания громкоговорителя и создаваемым им звуковым давлением. При сравнительно малых мощностях электрических колебаний, подводимых к громкоговорителю, он будет создавать сравнительно малые звуковые давления, которые будут восприняты ухом как негромкое звучание. При бóльших мощностях, подведенных к нему, он создает бóльшие звуковые давления, и звучание его будет воспринято как более громкое.

Приблизительно можно считать, что звуковое давление будет увеличиваться или уменьшаться пропорционально увеличению или уменьшению напряжения звуковой частоты, подведенного к громкоговорителю, или соответственно пропорционально корню квадратному из величины изменения мощности.

Выше мы говорили, что между изменением звукового давления и изменением громкости существует логарифмическая зависимость. Следовательно, громкость воспроизведения звуков громкоговорителем будет находиться также в логарифмической зависимости от подводимого напряжения и мощности.

Благодаря этому можно производить оценку увеличения (усиления) и уменьшения (ослабления) электрических напряжений и мощностей также в децибелах.

Определение усиления и ослабления напряжения и мощности в децибелах. Если обозначить через P_0 мощность одной величины, а через P — мощность другой, то разницу

между этими двумя мощностями в децибелах можно вычислить по формуле

$$S = 10 \lg \frac{P}{P_0}. \qquad (3)$$

Соответственно обозначив напряжение одной величины через U_0, а напряжение другой через U, разницу между ними в децибелах можно вычислить по формуле

$$S = 20 \lg \frac{U}{U_0}. \qquad (4)$$

Если величины P и U будут соответственно больше величин P_0 и U_0 (при усилении), то результат вычисления в децибелах будет иметь знак плюс; в обратном же случае (при ослаблении) результат вычислений будет иметь знак минус.

Уровень электрического напряжения и мощности в децибелах. Приняв условно некоторую величину напряжения или мощности звуковой частоты за нулевой электрический уровень, в децибелах можно выражать и величины напряжений и мощностей.

За нулевой уровень мощности принята мощность переменного тока в 1 *мвт*, выделяемая на активном сопротивлении в 600 *ом*, а за нулевой уровень напряжения — соответственно эффективное напряжение в 0,775 *в*, падающее на сопротивлении указанной величины.

Практически в технике радиовещания широко пользуются оценкой уровней напряжений в децибелах. Этот уровень можно определить по формуле

$$S = 20 \lg \frac{U}{0{,}775}, \quad \text{или} \quad S = 20 \lg\ 1{,}29\, U. \qquad (5)$$

Если напряжение будет меньше 0,775 *в*, то уровень напряжения, выраженный в децибелах, будет иметь отрицательный знак.

В табл. 1 приведены уровни ряда напряжений, выраженные в децибелах.

Не следует смешивать акустический уровень громкости в децибелах и электрический уровень в децибелах. Если, например, к громкоговорителю радиотрансляционной точки подведено напряжение звуковой частоты 30 *в*, соответствующее электрическому уровню напряжения 32 *дб*, это вовсе не означает, что при этом громкоговоритель создает громкость в 32 *дб*. При одном и том же подведенном уровне напряжения различные громкоговорители могут давать различные уровни громкости. Громкость зависит не только от уровня

ТАБЛИЦА 1

Электрические уровни напряжения, выраженные в децибелах

Напряжение, *в*	Уровень, *дб*	Напряжение, *в*	Уровень, *дб*	Напряжение, *в*	Уровень, *дб*	Напряжение, *в*	Уровень, *дб*
0,001	—58	0,07	—21	3	12	35	33
0,002	—52	0,08	—20	4	14	40	34
0,003	—48	0,09	—19	5	16	45	35
0,004	—46	0,1	—18	6	18	50	36
0,005	—44	0,2	—12	7	19	60	38
0,006	—42	0,3	—8,2	8	20	70	39
0,007	—41	0,4	—5,8	9	21	80	40
0,008	—40	0,5	—3,3	10	22	90	41
0,009	—39	0,6	—2,2	12	24	100	42
0,01	—38	0,7	—0,88	14	25	120	44
0,02	—32	0,775	0	16	26	140	45
0,03	—28	0,8	0,26	18	27	160	46
0,04	—26	0,9	1,3	20	28	180	47
0,05	—24	1	2,3	25	30	200	48
0,06	—22	2	8,2	30	32	220	49
						240	50

подведенного напряжения, но и от конструкции громкоговорителя, его коэффициента полезного действия и некоторых других причин. Однако можно считать, что увеличение или уменьшение электрического уровня на некоторое число децибел приводит к увеличению или уменьшению уровня громкости приблизительно на то же число децибел.

Ступени усиления. Коэффициент усиления и выходная мощность зависят: от числа и типов ламп, применяемых в усилителе; мощности и напряжения источников электроэнергии, которые должны его питать; схемы и конструкции усилителя.

В некоторых случаях, например, когда требуется не очень громкое воспроизведение передачи (в комнате небольших размеров), при приеме местных радиовещательных станций достаточно бывает иметь усилитель н. ч. всего с одной электронной лампой. Такой усилитель называют *одноступенным,* что в данном случае аналогично понятию одноламповый усилитель.

Однако с помощью одноступенного усилителя не удается обычно получить нормального звучания громкоговорителя при радиоприеме дальних станций или воспроизведении граммофонных записей. Дело в том, что одноступенный усилитель для того, чтобы отдать необходимую мощность,

должен получать напряжение, значительно большее по величине, чем дают многие источники напряжения н. ч. (детектор при дальнем приеме, звукосниматель и др.). В этих случаях напряжения, создаваемые источниками входного напряжения, приходится предварительно усиливать до величин, при которых оконечная (выходная) лампа усилителя могла бы отдать мощность, необходимую для нормальной работы громкоговорителя.

В одних случаях задача предварительного усиления может быть выполнена с помощью одной лампы (одной ступени усиления). В других случаях, когда напряжения, создаваемые источником (например, микрофоном), очень малы, необходимое усиление может быть обеспечено применением нескольких ламп (нескольких ступеней). При этом напряжение от источника входного напряжения подводится к одной лампе, усиленное ею напряжение подается на другую лампу и т. д. до тех пор, пока не получится напряжение достаточной величины. Такой усилитель называется *многоступенным.*

Итак, в многоступенном усилителе намечаются две стадии усиления: сначала усиливается напряжение, а затем получается необходимая мощность. Ступени, которые служат для усиления напряжения, носят соответственно название *ступеней усиления напряжения,* или *ступеней предварительного усиления,* а ступень, которая отдает потребителю необходимую мощность, называется *оконечной,* или *выходной.* Иногда ее называют также *мощной* ступенью, или ступенью *мощного усиления.*

Для увеличения мощности, отдаваемой потребителю, в оконечной ступени часто применяют две или большее четное число ламп, включаемых по так называемой двухтактной схеме. При этом иногда приходится и в предыдущей (предоконечной) ступени применять не одну, а две лампы. Следовательно, число ламп в усилителе в некоторых случаях может отличаться от числа его ступеней.

Следует отметить, что ступень предварительного усиления обычно передает следующей ступени напряжение при ничтожной мощности. В отдельных же случаях (которые мы рассмотрим ниже) для нормальной работы оконечной ступени необходимо, чтобы ступень, стоящая впереди нее, давала напряжение при более или менее значительной мощности. Такая предоконечная ступень по существу также должна быть названа «мощной» ступенью, но нагрузкой для нее является следующая за ней оконечная ступень.

3. ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Ко всякому усилителю предъявляется требование обеспечения усиления колебаний с возможно малыми искажениями; этим достигается наиболее естественное воспроизведение передачи.

Было бы, конечно, желательно, чтобы усилители вместе с громкоговорителями обеспечивали совершенно неискаженное воспроизведение передачи. Это имело бы место в том случае, если при подаче на вход усилителя напряжений различных частот с одинаковыми амплитудами, во-первых, при всех этих частотах на входе получались бы одинаковые мощности (напряжения), обеспечивающие воспроизведение передачи с естественной громкостью, и, во-вторых, на выходе не возникали бы напряжения с частотами, которых нет на входе усилителя.

Однако такую аппаратуру построить очень трудно, да практически это и не нужно, так как относительно небольшие искажения могут остаться незаметными для слушающих передачу. К тому же часто желательно слушать передачу с пониженной громкостью по сравнению с естественной.

Виды искажений. Если при одной и той же амплитуде напряжения, подаваемого на вход усилителя, на его выходе получаются различные мощности (напряжения) при различных частотах, т. е. если усилитель неодинаково (неравномерно) усиливает электрические колебания различных частот, значит усилитель создает *частотные искажения*. Чем больше разница в усилении различных частот, тем больше будут частотные искажения.

Когда же на выходе усилителя помимо колебаний с частотами, подведенными к его входу, возникают еще электрические колебания с частотами, которых нет на входе, значит усилитель создает *нелинейные искажения*. Чем больше амплитуды колебания этих новых частот, тем сильнее выражены нелинейные искажения.

Когда слушатель находится в лекционном, концертном зале или в театре, все созданные голосом человека или музыкальными инструментами звуковые колебания непосредственно воспринимаются слушателем, и он не может пожаловаться на то, что речь или музыка искажаются. С первого взгляда может показаться необходимым, чтобы радиопередатчик передавал, а громкоговоритель одинаково хорошо воспроизводил все звуковые частоты, т. е. частоты от 20—30 до 16 000—20 000 *гц*, причем в любой момент

звуки различной высоты, но одинаковой громкости должны одинаково громко звучать и в громкоговорителе; если же один передаваемый звук сильнее другого, то в громкоговорителе их относительная громкость должна сохраняться. Казалось бы, что только при этом условии громкоговоритель будет воспроизводить передачу вполне естественно.

Практически необходимый диапазон частот. В действительности же радиослушатель не всегда заметит искажения передачи, если колебания некоторых частот, воспринятые микрофоном, громкоговоритель воспроизведет слабее других, и даже если некоторые частоты вообще не будут воспроизведены.

Проведенные научные исследования показали, что ухудшения в передаче слушатель практически не заметит, если довести до него только часть указанного выше диапазона частот, лежащую в пределах от 50—60 до 6 500—8 000 *гц*. Другими словами, если исключить из передачи частоты ниже 50—60 и выше 6 500—8 000 *гц*, то естественность звучания практически не нарушится. Исходя из этих соображений, Государственный общесоюзный стандарт (ГОСТ 5651-51) на радиовещательные приемники устанавливает, что приемники 1-го класса должны обеспечивать воспроизведение частот от 50—60 до 6 500 *гц* *.

Тот же ГОСТ регламентирует для приемников 2-го класса воспроизведение частот от 100 до 4 000 *гц*. Отсутствие или значительное ослабление частот ниже 100 *гц* и выше 4 000 *гц* несколько ухудшает естественность звучания, но и при этом качество передачи остается достаточно хорошим.

Для приемников 3-го класса ГОСТ 5651-51 допускает диапазон усиливаемых частот от 150 до 3 500 *гц* и для приемников 4-го класса — от 200 до 3 000 *гц*. Но даже и при таких диапазонах частот воспроизведение передачи получается удовлетворительное.

Для усилителей радиотрансляционных узлов 1-го класса ГОСТ 5968-51 устанавливает рабочий диапазон частот от 50 до 10 000 *гц*, для усилителей того же назначения 2-го класса — от 60 до 8 000 *гц* и для 3-го класса — от 100 до 5 000 *гц*.

---

* Низшая частота в 60 *гц* установлена для приемников настольного типа и 50 *гц* — для радиоприемников консольного типа.

Более широкий диапазон воспроизведения частот возможен при приеме радиостанций с частотной модуляцией, работающих на ультракоротких волнах. Для приема этих передач рекомендуется строить приемники, обеспечивающие воспроизведение более широкого диапазона частот.

Полоса частот, воспроизводимая громкоговорителями. Практически почти невозможно сконструировать хороший и в то же время относительно недорогой громкоговоритель, который воспроизводил бы очень широкую полосу частот. Исходя из этого, а также из вышеизложенных соображений, современные электродинамические громкоговорители массового производства конструируются и строятся с расчетом на воспроизведение частот только от 50—100 *гц* и самое большее до 5 000—7 000 *гц*.

В громкоговорящих установках высшего класса, от которых требуется воспроизведение частот от самых низких до частот выше 10 000 *гц*, применяется два или большее число громкоговорителей, причем один громкоговоритель (или одна группа громкоговорителей) воспроизводит только относительно низкие частоты (например, от 30—40 до 500—800 *гц*), а другой громкоговоритель (или другая их группа) — относительно высокие частоты (например, от 500—800 до 10 000—15 000 *гц*).

Широко распространенный электромагнитный громкоговоритель типа «Рекорд» воспроизводит частоты только от 250 до 2 500 *гц*, т. е. не обеспечивает достаточно естественного воспроизведения передачи. Человеческие голоса при воспроизведении этим громкоговорителем в большой степени теряют свою естественность, но разборчивость речи получается все же вполне достаточной.

Допустимая неравномерность пропускания частот. Слушатель может заметить даже незначительное изменение высоты звука (частоты), но в то же время его ухо менее чувствительно к изменениям величины звукового давления.

Ухудшение качества воспроизведения передачи практически незаметно даже тогда, если звуковые давления на самых высоких и самых низких воспроизводимых звуковых частотах будут в несколько раз меньше, чем на средних. Поэтому при конструировании и производстве громкоговорителей массовых типов и не добиваются абсолютно одинакового звучания всех частот воспроизводимой полосы. ГОСТ 5651-51 на радиовещательные приемники допускает неравномерность воспроизведения частот громкоговорителями приемников до 5—8 раз (на 14—18 *дб*) по звуковому давлению в пределах частотных диапазонов, установленных для приемников соответствующих классов.

Большинство современных усилителей, используемых для приема радиовещательных передач и для воспроизведения граммофонных записей, строится с таким расчетом, что-

бы усиление различных частот в пределах выбранной полосы не отличалось больше чем в два раза.

Для усилителей 1-го класса радиотрансляционных узлов ГОСТ 5968-51 допускает неравномерность усиления в пределах полной рабочей полосы частот (от 50 до 10 000 *гц*) не более чем в 1,25 раза (на 2 *дб*); в то же время неравномерность усиления в полосе частот от 100 до 7 000 *гц* не должна быть более чем в 1,12 раза (на 1 *дб*). Для усилителей того же назначения, но 2-го класса, допускается неравномерность усиления в рабочей полосе частот (от 60 до 8 000 *гц*) примерно в 1,4 раза (на 3 *дб*). Для усилителей 3-го класса допускается неравномерность усиления в рабочей полосе (100—5 000 *гц*) примерно в 1,8 раза (на 5 *дб*).

Коррекция частотных искажений. Отметим, что в отдельных случаях, когда, например, громкоговоритель плохо воспроизводит верхние или нижние частоты, можно подобрать элементы схемы усилителя так, чтобы на этих частотах усиление было больше, чем на других частотах, и таким образом добиться выравнивания воспроизведения различных частот. Наоборот, если громкоговоритель «выкрикивает» на верхних или нижних частотах, усилитель должен быть построен с расчетом на меньшее усиление этих частот с целью ликвидировать эти «выкрики». Указанный подбор элементов схемы носит название *коррекции* частотных искажений.

Так как чувствительность уха к слабым колебаниям нижних и верхних частот понижается, то при слушании передач с пониженной громкостью рекомендуется нижние и верхние частоты звукового диапазона усиливать больше, чем средние. Если не сделать этого, слушатель будет оценивать такую передачу как искаженную (с ослабленными нижними и верхними частотами). Это приводит к целесообразности применения так называемых «компенсированных» регуляторов усиления (см. стр. 130).

Заведомо неравномерное усиление различных частот полосы приходится осуществлять в усилителях магнитофонов; так, в усилителях, применяемых в высококачественных магнитофонах для записи, усиление должно плавно увеличиваться с повышением частоты (на частоте 10 *кгц* оно должно быть на 12—20 *дб* больше, чем на частоте 1 *кгц*); в усилителях же, работающих при воспроизведении, необходимо иметь подъем усиления на нижних частотах (до 17 *дб* на частоте 100 *гц*), а также и на верхних частотах (до 6 *дб* на частоте 10 *кгц*).

Частотные характеристики. Зависимость усиления от частоты удобнее всего показывать графически с помощью кривой, носящей название *частотной характеристики.*

Для получения частотной характеристики усилителя на его вход включается генератор электрических колебаний н. ч., а на выход — нормальное для усилителя нагрузочное (чисто активное) сопротивление. Параллельно нагрузке включается вольтметр (ламповый или купроксный), дающий одинаково точные показания при всех частотах *.

В процессе снятия частотной характеристики изменяют частоту напряжения, даваемого генератором. При всех частотах напряжения на входе усилителя должны быть совершенно одинаковы.

Для каждой частоты записывают показания вольтметра, включенного на выход усилителя. Выходное напряжение на одной из средних частот (обычно выбирают частоту 400, 800 или 1 000 *гц*) принимают за нормальное и вычисляют, какую часть от него составляют напряжения при всех других частотах.

Далее заготовляют координатную сетку для вычерчивания частотной характеристики: по горизонтальной оси наносят (обычно в логарифмическом масштабе) частоты, а по вертикальной — относительные величины выходного напряжения (фиг. 3). На полученную таким образом сетку наносят полученные при измерениях точки и проводят через них линию. Это и будет частотная характеристика.

Полоса пропускания. Познакомившись с частотной характеристикой усилителя, мы можем уточнить понятие «полоса пропускания». Полосой пропускания называется интервал между низшей и высшей частотами, в котором имеет место изменение усиления не больше, чем в заданное число раз по сравнению с усилением на выбранной средней частоте этой полосы. Если задаться большей допустимой неравномерностью усиления, мы получим и более широкую полосу пропускания (фиг. 3). Следовательно, полоса пропускания является величиной условной, зависящей от выбранной неравномерности усиления.

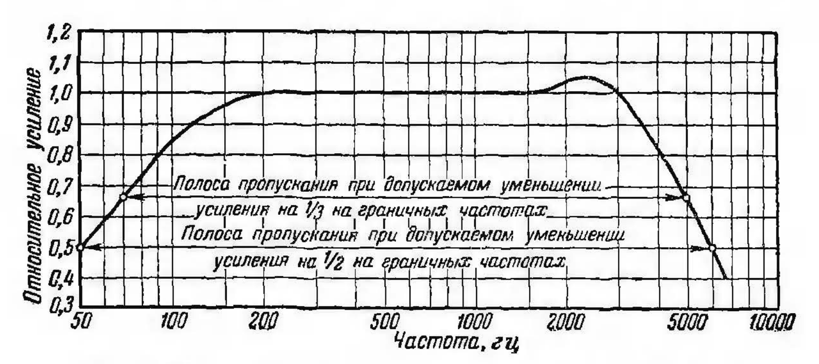
Из определения полосы пропускания отнюдь не следует, что усилитель совсем не усиливает (не пропускает) колебания с частотами, находящимися за пределами этой полосы

---

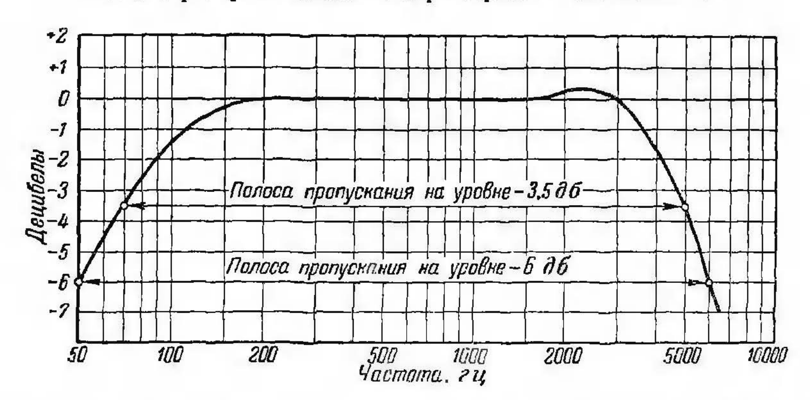
* Вольтметр электромагнитного типа, предназначенный для измерения переменного тока с частотой 50 *гц*, непригоден, так как при частотах в несколько сотен герц и выше он дает неверные показаиия.

(более низкие и более высокие). Такие колебания могут существовать на выходе усилителя, но их напряжения будут меньше напряжений на крайних частотах полосы пропускания.

Из формы частотной характеристики усилителя становятся понятными такие употребляемые термины, как «завал



Фиг. 3. Примерная частотная характеристика усилителя н. ч.



Фиг. 4. Частотная характеристика, аналогичная фиг. 3, где отношения усилений на различных частотах выражены в децибелах.

усиления» и «подъем усиления» (на таких-то частотах). Первый из них тождественен термину «уменьшение усиления», а второй — термину «увеличение усиления» (на таких-то частотах).

Частотные искажения (неравномерность воспроизведения различных частот) можно выразить в децибелах. Так, например, вместо того чтобы сказать: «на крайних частотах

полосы пропускания усиление уменьшается в два раза», говорят, что «на крайних частотах полосы пропускания усиление уменьшается на 6 *дб*» или «усиление на крайних частотах составляет минус 6 *дб* по сравнению с усилением на такой-то средней частоте». На фиг. 4 показана частотная характеристика, аналогичная характеристике фиг. 3, но на ней отношения напряжений на различных частотах выражены в децибелах.

4. НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Усилитель вносит нелинейные искажения в том случае, когда кривая, по которой изменяется напряжение на его выходе, по своей форме отличается от кривой, по которой изменяется напряжение, подведенное к его входу. Это искажение формы кривой свидетельствует о появлении в воспроизводимой передаче дополнительных частот.

В простейшем случае, когда к входу усилителя подводится напряжение, изменяющееся по синусоидальной кривой, а форма выходного напряжения более или менее отличается от синусоиды (это легко увидеть на экране электронно-лучевого осциллографа, включенного на выход усилителя) — на выходе усилителя появляются частоты, в целое число раз большие подведенной частоты. Так, например, если к усилителю подводится переменное синусоидальное напряжение с частотой в 100 *гц*, то кроме этой основной частоты возникают частоты $100 \cdot 2 = 200$ *гц*, $100 \cdot 3 = 300$ *гц*, $100 \cdot 4 = 400$ *гц* и т. д. Эти новые частоты носят название *гармоник*. Число, показывающее, во сколько раз частота гармоники больше основной частоты, носит название *номера гармоники*. Так, например, для основной частоты 100 *гц* частота 200 *гц* будет второй гармоникой, 300 *гц* — третьей гармоникой и т. д. Чем больше форма кривой отличается от синусоиды, тем больше амплитуды гармоник. Обычно наиболее интенсивными на выходе усилителя бывают вторая или третья гармоники.

При несинусоидальном входном напряжении нет такой простой зависимости. Так как такое напряжение само может рассматриваться как состоящее из ряда синусоидальных переменных напряжений с различными частотами, на выходе усилителя получается большое количество различных частот. При значительных по величине напряжениях гармоник передача приобретает неприятный оттенок, голоса и музыкальные инструменты звучат не вполне естественно. При дальнейшем увеличении гармоник в передаче возни-

кают хрипы, дребезжание, разборчивость передачи ухудшается. Наконец, когда эти дополнительные частоты очень сильны, передача делается совершенно неразборчивой (превращается в сплошной хрип и шум).

Коэффициент нелинейности. Величина нелинейных искажений может быть оценена количественно при подаче на усилитель синусоидального напряжения и при этом выражена так называемым *коэффициентом нелинейности,* который оценивается в процентах и определяется по формуле

$$\nu = 100\frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \ldots + U_n^2}}{U_1}, \qquad (6)$$

где U_1 — эффективное напряжение колебаний основной частоты;

$U_2, U_3, \ldots, U_n$ — эффективные напряжения колебаний второй, третьей, ..., n-й гармоник.

Усилители н. ч. и радиоприемники принято характеризовать коэффициентом нелинейности для одной или нескольких основных частот, который имеет место при номинальной мощности на выходе. Когда на выходе усилителя получается меньшая мощность, коэффициент нелинейности, как правило, получается меньше.

Допустимая величина нелинейных искажений. Многочисленные исследования вопроса о влиянии гармоник на качество передачи показывает, что при воспроизведении полосы частот до 6 000—7 000 *гц* нелинейные искажения совершенно не ощущаются на слух, если коэффициент нелинейности не превышает 7—10%. Практически же нелинейные искажения мало заметны даже при коэффициенте нелинейности, достигающем 12—14%. При дальнейшем его увеличении нелинейные искажения начинают сначала ощущаться во время громкого воспроизведения речи, а затем при воспроизведении музыки и пения.

Исходя из этого, ГОСТ на радиовещательные приемники устанавливает, что коэффициент нелинейности приемников 1-го класса (включая искажения, создаваемые их громкоговорителями) на частотах от 100 до 400 *гц* не должен превышать 7%, падая ниже 5% на частотах более 400 *гц;* только для частот ниже 100 *гц* допускается коэффициент нелинейности до 12%. Коэффициент нелинейности приемников 2-го класса также установлен не более 7% для частот выше 200 *гц;* на частотах от 100 до 200 *гц* для приемников этого класса допускается коэффициент нелинейности до 10%. На-

конец, для радиоприемников 3-го и 4-го классов ГОСТ устанавливает коэффициент нелинейности в 12% для частот от 200 до 400 *гц* с понижением его до 10% и ниже на частотах выше 400 *гц*.

Выше упоминалось, что нелинейные искажения создаются как усилителем, так и громкоговорителем. Нелинейные искажения, создаваемые громкоговорителем, даются для максимальных мощностей, на которые эти громкоговорители рассчитаны. Так, при максимальной мощности, равной 1 *вт*, на которую рассчитан динамический громкоговоритель типа 1ГД-1, при максимальной мощности 3 *вт*, на которую рассчитан динамический громкоговоритель 3ГД-3, и при расчетных максимальных мощностях 0,35 и 0,25 *вт* соответственно для динамических громкоговорителей типов 0,35 ГД и ДАГ-1 — все они на самых низких частотах звукового диапазона воспроизводят передачу с коэффициентом нелинейности до 7% при условии, что усилитель подает на них передачу без нелинейных искажений. При меньшей мощности, подведенной к громкоговорителю, создаваемые им нелинейные искажения уменьшаются.

Если же к громкоговорителю подводится передача, уже содержащая нелинейные искажения, то громкоговоритель «добавляет» в передачу свои нелинейные искажения и коэффициент нелинейности усилителя вместе с громкоговорителем получается большим, чем у каждого из них в отдельности.

Чтобы суммарные нелинейные искажения воспроизводимой передачи не превышали вышеуказанных величин (7—14%), необходимо, чтобы коэффициент нелинейности усилителя был меньше этих величин *.

Наибольшую мощность, которую усилитель отдает громкоговорителю при заданном коэффициенте нелинейности,

---

* Для получения полной величины коэффициента нелинейности нельзя просто арифметически складывать коэффициент нелинейности усилителя с коэффициентом нелинейности громкоговорителя, так как здесь изменение коэффициента нелинейности происходит по более сложному закону. Если, например, коэффициент нелинейности усилителя равен 5%, а коэффициент нелинейности громкоговорителя составляет 7%, то общий коэффициент нелинейности будет равен не 12%, а составит меньшую величину. Кроме того, общая величина коэффициента нелинейности воспроизводимой передачи зависит еще от нелинейных искажений, вносимых другими элементами тракта радиопередачи: микрофоном в студии, усилителем студии, передающей радиовещательной станцией, детектором радиоприемника и т. п. Все эти элементы также создают гармоники с напряжением, составляющим в общей сложности несколько процентов напряжения основной частоты.

обычно условно называют максимальной неискаженной мощностью.

Для усилителей 1-го класса радиотрансляционных узлов ГОСТ 5968-51 допускает коэффициент нелинейности не более 4% на частотах до 100 *гц* и не более 2,5% на всех частотах свыше 100 *гц*; для усилителей 2-го класса того же назначения допускается коэффициент нелинейности не более 10% на частотах до 100 *гц* и не более 4% на частотах свыше 100 *гц*; на всех частотах рабочей полосы усилителей 3-го класса коэффициент нелинейности не должен превышать 8%.

Условия получения минимальных нелинейных искажений при усилении. С уменьшением подведенной к громкоговорителю мощности создаваемые им нелинейные искажения уменьшаются. Поэтому рекомендуется применять динамические громкоговорители, рассчитанные на бо́льшую мощность, чем это необходимо.

Применение более мощных динамических громкоговорителей целесообразно еще и потому, что они более чувствительны, чем менее мощные (например, трехваттный громкоговоритель будет работать несколько громче, чем одноваттный при той же подводимой к нему мощности 0,5 *вт*).

Из тех же соображений для обслуживания жилой комнаты средних размеров при наличии электросети желательно иметь усилитель н. ч., имеющий запас выходной мощности. Заставляя его работать с неполной отдачей, мы подадим на громкоговоритель передачу с малыми нелинейными искажениями.

При необходимости питать радиоприемник или усилитель н. ч. от батарей, когда из соображений экономии электроэнергии приходится ограничивать выходную мощность усилителя величиной до 100—200 *мвт*, следует рекомендовать применение новых, разработанных нашей отечественной промышленностью экономичных динамических громкоговорителей, которые обеспечивают для комнаты средних размеров достаточно громкое звучание при подаче на них мощности колебаний н. ч. до 40—100 *мвт*.

Фон переменного тока. Кроме напряжений с частотами гармоник, на выходах усилителей (радиоприемников), питаемых от сетей переменного тока, получаются напряжения с частотой этого тока и его гармоник (50, 100 *гц* и т. д.), вследствие чего в громкоговорителе бывает слышен фон переменного тока. Полностью избавиться от этих вредных напряжений невозможно. Поэтому ставится задача сделать

эти напряжения настолько малыми, чтобы фон был по возможности незаметным. ГОСТ на радиовещательные приемники устанавливает, что напряжение фона на выходе должно быть меньше наибольшего напряжения полезного сигнала по крайней мере в 200 раз (на 46 *дб*) в приемниках 1-го класса, в 70 раз (на 37 *дб*) в приемниках 2-го класса и в 20 раз (на 26 *дб*) в приемниках 3-го класса.

ГОСТ на усилители для радиотрансляционных узлов указывает, что напряжение фона и других собственных шумов на выходе таких усилителей должно быть меньше наибольшего полезного напряжения по крайней мере в 560 раз (на 55 *дб*) в усилителях 1-го класса, в 320 раз (на 50 *дб*) в усилителях 2-го класса и в 100 раз (на 40 *дб*) в усилителях 3-го класса.

5. ПРИНЦИП УСИЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП

Всякая усилительная ступень работает на какую-либо нагрузку, включенную в анодную цепь или связанную с анодной цепью ее электронной лампы. В зависимости от назначения ступени в ее анодную цепь может быть включена обмотка трансформатора, дросселя, электромагнитного громкоговорителя или сопротивление.

Принцип действия усилительной ступени таков. Переменное напряжение, подлежащее усилению, вводится в цепь управляющей сетки электронной лампы. От действия этого напряжения возникают пульсации анодного тока электронной лампы, т. е. в ее анодном токе появляется переменная составляющая, имеющая ту же частоту, что и напряжение, действующее в цепи сетки. Изменяющийся анодный ток, проходя через обмотку (или сопротивление), включенную в анодную цепь лампы, создает на ней изменяющееся по величине падение напряжения, т. е. на этой обмотке (сопротивлении) появляется переменная составляющая напряжения.

Эффект усиления заключается в том, что амплитуда этой переменной составляющей напряжения больше амплитуды напряжения, подведенного к управляющей сетке лампы. В то же время и мощность переменной составляющей на нагрузке, определяемая, как обычно, произведением эффективных значений напряжения и тока, также будет больше, чем мощность, подводимая к цепи сетки.

Для того чтобы получить от усилительной ступени напряжение и мощность значительно большие, чем напряжение

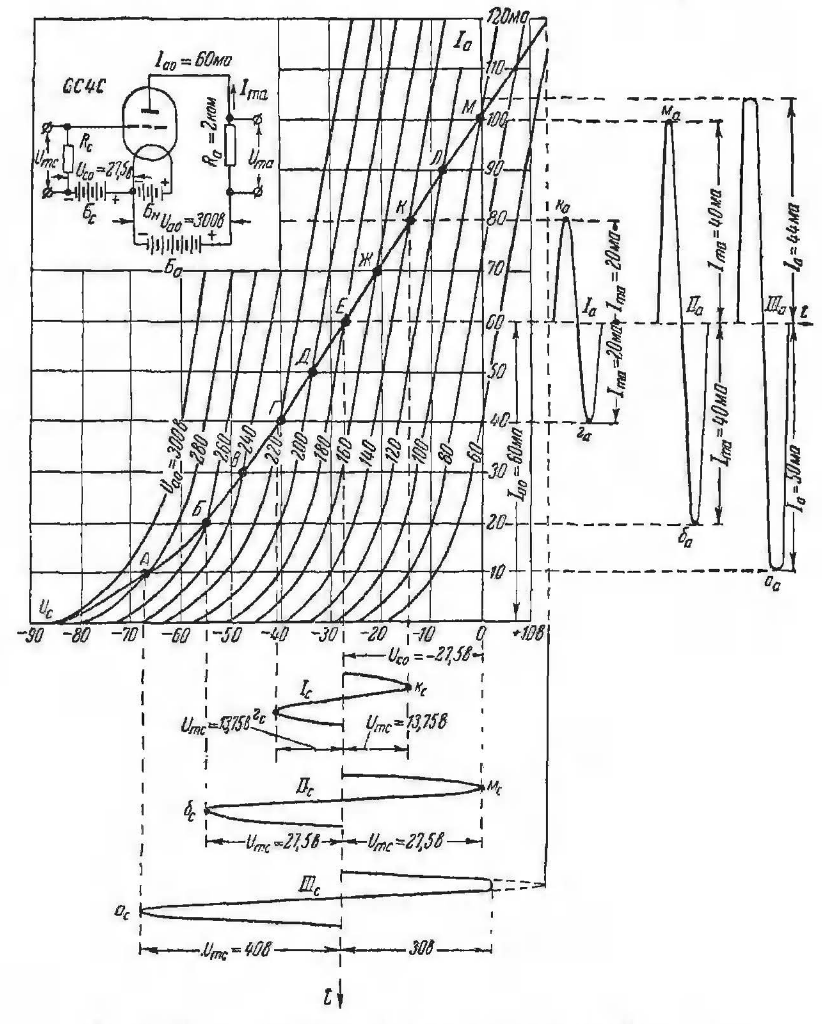
и мощность, поступающие в цепь ее сетки, и чтобы кривые, показывающие изменения тока через нагрузку и напряжение на ней, по возможности мало отличались по форме от кривой, по которой изменяется напряжение на сетке (что обеспечивает усиление с малыми искажениями) необходимо: 1) подать на нить лампы нормальное напряжение накала; 2) подать на ее анод (и на экранную сетку в случае пентода или лучевого тетрода) необходимое положительное напряжение; 3) дать на управляющую сетку соответствующее отрицательное напряжение смещения.

Динамические характеристики. Чтобы лучше понять, почему электронная лампа усиливает электрические колебания, познакомимся с так называемыми динамическими характеристиками лампы. Они отличаются от статических тем, что снимаются с лампы при включенной в ее анодную цепь нагрузке. Разберем простейший случай, когда в анодную цепь лампы включено активное сопротивление.

На фиг. 5 относительно тонкими линиями начерчены статические характеристики трехэлектродной лампы типа 6С4С, показывающие зависимость между напряжением на сетке и анодным током при различных анодных напряжениях. Посмотрим, какова будет динамическая характеристика этой лампы, если взять напряжение источника анодного питания $U_{a0} = 300$ *в* и включить в анодную цепь сопротивление $R_a = 2\,000$ *ом*. При этом напряжение на аноде лампы не будет при всех условиях равно напряжению источника, т. е. 300 *в*; его величина будет зависеть от тока I_a, который проходит в анодной цепи. Часть напряжения источника питания будет падать на сопротивлении R_a и тем большая, чем больше анодный ток.

Допустим, что при некотором отрицательном напряжении на сетке в анодной цепи проходит ток $I_a = 10$ *ма* $= 0{,}01$ *а*. На сопротивлении $R_a = 2\,000$ *ом* при этом будет падение напряжения $0{,}01 \cdot 2\,000 = 20$ *в*. Соответственно на аноде лампы останется напряжение 300 *в* — 20 *в* = 280 *в*. Находим на статической характеристике для анодного напряжения $U_{a0} = 280$ *в* точку, соответствующую току $I_a = 10$ *ма*. Обозначим ее буквой *А*. Если в результате уменьшения отрицательного смещения на сетке анодный ток возрастет до 20 *ма*, падение напряжения на сопротивлении R_a увеличится до $0{,}02 \cdot 2\,000 = 40$ *в*, а напряжение на аноде уменьшится до $300 - 40 = 260$ *в*. Найдем точку, соответствующую току $I_a =$

$=20$ *ма* на характеристике для анодного напряжения $U_a = 260$ *в*, и обозначим ее буквой *Б*. При токе в 30 *ма* мы получим падение напряжения на сопротивлении R_a, равное



Фиг. 5. Динамическая характеристика электронной лампы.

60 *в*, и напряжение на аноде 240 *в*. Этим значениям напряжения и тока соответствует точка *В*. Подобным же образом получаем точки *Г*—*М* на фиг. 5. Соединив все эти

точки между собой линией, получим динамическую характеристику лампы 6С4С при анодном сопротивлении 2 000 *ом* и напряжении источника анодного питания 300 *в*. Как видно из фиг. 5, в том месте, где динамическая характеристика пересекает нижние сгибы статических характеристик триода, она также имеет кривизну*.

При других напряжениях U_{a0} и других величинах сопротивлений R_a динамическая характеристика займет иное положение. Чем больше будет величина R_a, тем меньше будет наклон, а следовательно, и крутизна динамической характеристики.

Из динамической характеристики видно, что при наличии сопротивления R_a в анодной цепи, когда вследствие увеличения отрицательного напряжения на сетке анодный ток уменьшается, напряжение на аноде возрастает; наоборот, при уменьшении отрицательного напряжения на сетке анодный ток возрастает, а напряжение на аноде уменьшается. При переходе через нуль в область положительного напряжения на сетке рост последнего ведет к дальнейшему увеличению анодного тока и к дальнейшему уменьшению напряжения на аноде.

Лампа с переменным напряжением в цепи сетки. Посмотрим теперь, что получится, если в цепь сетки лампы 6С4С ввести переменное напряжение, подав одновременно на ее управляющую сетку отрицательное смещение величиной, например $U_{c0} = -27{,}5$ *в*. Разберем случай, когда в цепи сетки действует переменное напряжение, изменяющееся по синусоидальному закону и имеющее амплитуду $U_{mc} = 13{,}75$ *в*.

Из точки *E* на прямолинейной части динамической характеристики рис. 5, соответствующей напряжению смещения минус 27,5 *в*, проведем вниз вертикальную линию и построим на ней, как на оси, кривую *Ic* переменного напряжения, поступающего в цепь сетки. Посмотрим, чему будет равно в отдельные моменты времени общее напряже-

---

* Следует заметить, что нижний сгиб у динамической характеристики менее ярко выражен, чем у статических характеристик, т. е. динамическая характеристика в целом более прямолинейна, чем статическая. Когда в анодную цепь лампы включено сопротивление R_a очень большой величины, всю динамическую характеристику можно считать практически прямолинейной. А прямолинейность динамической характеристики, как мы увидим дальше, является одним из главнейших условий усиления с минимальными нелинейными искажениями.

ние в цепи сетки. Во время того полупериода, когда от источника переменного напряжения на сетку будет поступать плюс, т. е. напряжение, противоположное по знаку напряжению смещения, общее напряжение в цепи сетки будет равно разности этих напряжений. В момент амплитудного значения переменного напряжения результирующее отрицательное напряжение на сетке будет равно напряжению 27,5 *в* минус 13,75 *в*, т. е. на сетке получится отрицательное напряжение минус 13,75 *в* (точка $к_с$). Во время следующего полупериода напряжение, поступающее от источника переменного напряжения, будет совпадать по знаку с напряжением постоянного сеточного смещения и общее напряжение в цепи сетки будет равно арифметической сумме этих двух отрицательных напряжений. Так, в момент амплитудного значения переменного напряжения общее напряжение на сетке будет равно минус 41,25 *в* (точка $г_с$). В промежуточные моменты напряжение на сетке может быть найдено подобным же образом.

Переменная составляющая анодного тока. Построим теперь геометрически кривую изменения тока в анодной цепи от действия переменного напряжения в цепи сетки. Из точки E на фиг. 5 проведем вправо горизонтальную прямую. Расстояние этой прямой от горизонтальной оси графика даст нам в масштабе постоянную слагающую анодного тока, т. е. его величину при отсутствии переменного напряжения в цепи сетки. На продолжении этой линии вправо от вертикальной оси графика будем откладывать время t в том же масштабе, которым мы пользовались для построения кривой сеточного напряжения.

Определим сначала анодный ток для момента амплитудного положительного значения переменного напряжения, т. е. для такого момента, когда общее напряжение на сетке равно минус 13,75 *в*. Для этого из точки $к_с$ на кривой, изображающей изменение напряжения на сетке, проводим вертикальную линию до пересечения с характеристикой (точка K) и по вертикальной оси читаем, что при этом ток в анодной цепи достигнет величины 80 *ма*.

Посмотрим, что получится во время полупериода противоположного знака. В момент амплитудного значения общему напряжению в цепи сетки, равному минус 41,25 *в*, соответствует точка $г_с$ на кривой изменения сеточного напряжения. Проведя из этой точки таким же способом, как это мы делали раньше, прямую до пересечения с динами-

ческой характеристикой (точка *Г*) и отсчитав величину тока по вертикальной оси, мы увидим, что в этот момент ток в анодной цепи лампы уменьшится до 40 *ма.* В другой момент, когда переменное напряжение будет проходить через нулевое значение, на сетке будет существовать только одно напряжение смещения, и ток через лампу будет равен 60 *ма* (постоянная слагающая).

Проведем затем вправо от характеристики из точек *К* и *Г* прямые линии, параллельные горизонтальной оси. Расстояние этих прямых от горизонтальной линии, по которой отложено время, дадут нам в масштабе амплитудные величины, на которые изменяется ток в анодной цепи от действия переменного напряжения на сетке, и мы сможем начертить кривую *Iа* изменения тока в анодной цепи.

Из этой кривой видно, что анодный ток увеличивается и уменьшается на равные величины по 20 *ма* в каждую сторону. При этом кривая *Iа* изменения тока в анодной цепи такая же по форме, как и кривая *Iс* изменения сеточного напряжения.

Максимальная величина, на которую увеличивается или уменьшается ток в анодной цепи от действия переменного напряжения в сеточной цепи, является амплитудой переменной составляющей анодного тока. В нашем случае (фиг. 5), следовательно, амплитуда переменной составляющей анодного тока $I_{ma} = 20$ *ма.*

Если амплитуду подаваемого на сетку напряжения увеличить до $U_{mc} = 27{,}5$ *в*, ток в анодной цепи будет колебаться с большей амплитудой $I_{ma} = 40$ *ма.* Это показано на фиг. 5 путем аналогичного графического построения кривых *IIс* и *IIа.*

Пример расчета усиления, создаваемого лампой. Покажем на числовом примере, что электронная лампа дает усиление напряжения. Для этого будем сравнивать переменные напряжения в цепи сетки и на сопротивлении R_a. В нашем примере, когда к сетке лампы подведено напряжение U_{mc} с амплитудой 13,75 *в* (фиг. 5), в момент амплитудного значения положительного полупериода напряжения в цепи сетки, когда анодный ток возрос от величины тока покоя 60 *ма* (точка *Е*) до 80 *ма* (точка *К*), напряжение на аноде уменьшается на 40 *в* (от 180 до 140 *в*), а напряжение на сопротивлении R_a возрастает на такую же величину; в момент амплитудного отрицательного значения

напряжения в цепи сетки, когда анодный ток уменьшился от величины тока покоя 60 *ма* до 40 *ма* (точка *Г*), напряжение на аноде увеличивается также на 40 *в* (от 180 до 220 *в*), а напряжение на сопротивлении R_a на столько же уменьшается. Величина 40 *в* и является амплитудой напряжения н. ч. U_{ma} на сопротивлении R_a.

Число, показывающее, во сколько раз U_{ma} больше U_{mc}, носит название *усиления ступени по напряжению.* Оно может быть вычислено по формуле

$$K_0 = \frac{U_{ma}}{U_{mc}}. \qquad (7)$$

В нашем примере

$$K_0 = \frac{40}{13,75} \approx 3.$$

Если известен коэффициент усиления лампы μ и ее внутреннее сопротивление R_i, то усиление ступени по напряжению может быть вычислено без построения динамической характеристики, по формуле

$$K_0 = \mu \frac{R_a}{R_a + R_i}. \qquad (8)$$

Лампа 6С4С имеет $\mu = 4,2$ и $R_i = 800$ *ом*. Следовательно, в нашем примере

$$K_0 = 4,2 \frac{2\,000}{2\,000 + 800} = 3.$$

Из формулы (8) видно, что ступень, в которой работает лампа с бо́льшим μ, может давать большее усиление. Поэтому, когда нужно получить от ступени большое усиление по напряжению, в ней применяют лампы (чаще всего пентоды) с большим коэффициентом усиления.

Точка на динамической характеристике лампы, определяемая величиной постоянного смещения на ее управляющей сетке и в свою очередь определяющая величину анодного тока покоя I_{a0} (величину постоянной составляющей анодного тока лампы), носит название *рабочей точки* лампы усилительной ступени. На фиг. 5 для сеточного смещения $U_{c0} = -27,5$ *в* рабочей точкой будет точка *Е*. От проходящей через нее вертикальной прямой ведется отсчет значений переменной составляющей напряжения на управляющей сетке лампы, а от проходящей через рабочую точку гори-

зонтальной прямой отсчитываются изменения ее анодного тока.

Мощность на анодной нагрузке. Мощность переменной составляющей, получающаяся на сопротивлении R_a, может быть вычислена по формулам:

$$P_{a\sim}=\frac{I_{ma}U_{ma}}{2};\ P_{a\sim}=\frac{I_{ma}^2R_a}{2};\ P_{a\sim}=\frac{U_{ma}^2}{2R_a}. \qquad (9)$$

В нашем примере при $I_{ma}=20$ *ма* $=0,02$ *а* и $U_{ma}=$ $=40$ *в* (см. кривые *Ic* и *Ia* на фиг. 5)

$$P_{a\sim}=\frac{0,02\cdot 40}{2}=0,4\ вт,$$

а если увеличить амплитуду напряжения в цепи сетки до 27,5 *в* (см. кривые *IIc* и *IIa* на фиг. 5), то получим $I_{ma}=$ $=40$ *ма* $=0,04$ *а*, $U_{ma}=80$ *в* и

$$P_{a\sim}=\frac{0,04\cdot 80}{2}=1,6\ вт^*.$$

Как видно из формул (8) и (9), усиление ступени K_0 и мощность $P_{a\sim}$ зависят от величины сопротивления R_a (с увеличением R_a увеличивается и K_0).

Практически при работе оконечных ступеней с трехэлектродными лампами величину R_a берут в два-три раза больше R_i, причем для каждой величины напряжения источника анодного питания существует некоторая оптимальная величина анодного нагрузочного сопротивления, при котором на нем получается наибольшая мощность при минимальных нелинейных искажениях. В ступенях предварительного

---

* Усиление ступени по мощности, т. е. отношение мощности $P_{a\sim}$ на анодной нагрузке к мощности $P_{c\sim}$, расходуемой от источника усиливаемых колебаний, соединенного с цепью сетки лампы, может быть очень велико. Так, например, если в цепь сетки (фиг. 5) включено сопротивление $R_c=270$ *ком*, то при $U_{mc}=U_{c0}=27,5$ *в* от источника усиливаемых колебаний будет расходоваться мощность $P_{c\sim}=\frac{27,5^2}{2\cdot 270\,000}\approx$ $\approx 0,0014$ *вт* и усиление по мощности, определяемое как $\frac{P_{a\sim}}{P_{c\sim}}=\frac{1,6}{0,0014}$, будет более 1 000 *в*, то время как усиление по напряжению $\frac{U_{ma}}{U_{mc}}\approx 3$.

усиления с триодами величину анодного сопротивления R_a берут до 10—20 раз больше внутреннего сопротивления лампы. Когда же в усилителях н. ч. применяются пентоды или лучевые тетроды, величина R_a должна быть меньше их внутренних сопротивлений.

Искажения при чрезмерно больших напряжениях в цепи сетки. Если на сетку лампы, характеристика которой дана на фиг. 5, подать напряжение U_{mc} с амплитудой, например, 40 *в*, то кривая *IIIа* анодного тока будет отличаться по форме от кривой *IIIс* сеточного напряжения, т. е. появятся нелинейные искажения. Выясним, почему это происходит.

При отрицательном полупериоде U_{mc} в этом случае используется частично и криволинейная часть характеристики, в результате чего получается уменьшение анодного тока с 60 до 10 *ма*, т. е. на 50 *ма* (вместо 60 *ма*, если бы характеристика была прямолинейной). Во время другого полупериода суммарная величина напряжения на сетке в течение некоторого времени получается с положительным знаком вследствие того, что амплитуда переменного напряжения превышает напряжение смещения. При положительном же напряжении на сетке появляется сеточный ток, который создает дополнительную нагрузку для источника переменного напряжения и вызывает увеличенное падение напряжения на его внутреннем сопротивлении. Вследствие этого амплитуда напряжения, поступающего на сетку лампы во время положительного полупериода, будет меньше, чем во время отрицательного полупериода.

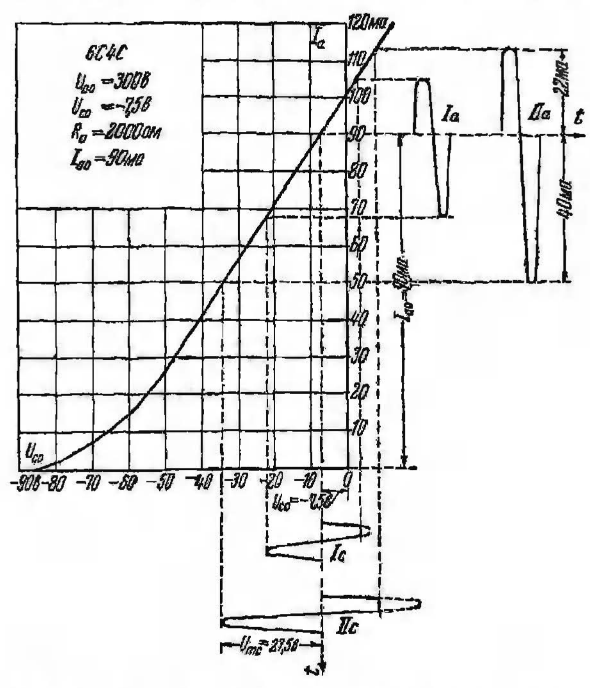
В нашем случае, имея при отрицательном полупериоде амплитуду в 40 *в*, при положительном полупериоде получаем только 30 *в* (с заходом на 2,5 *в* в область положительных напряжений на сетке). В результате прирост анодного тока получается только до 104 *ма* (вместо тока в 120 *ма*, который был бы при $U_{ma} = 40$ *в*). Итак, при чрезмерно большом переменном напряжении в цепи сетки изменения анодного тока во время различных полупериодов не одинаковы по величине. К тому же верхушки кривой *IIIа* этого тока теряют синусоидальную форму.

При дальнейшем увеличении переменного напряжения, подаваемого на сетку, кривая анодного тока будет искажена еще больше.

Искажения при недостаточном смещении на сетке. Если взять ту же лампу, характеристика которой дана на фиг. 5,

но подать на ее сетку меньшее смещение, например минус 7,5 *в*, то при амплитуде переменного напряжения 27,5 *в* во время положительного полупериода появляется сеточный ток, наличие которого приводит к искажению формы кривой анодного тока (фиг. 6).

Недостаточное смещение на сетке может привести и к другому неприятному явлению. С уменьшением смещения

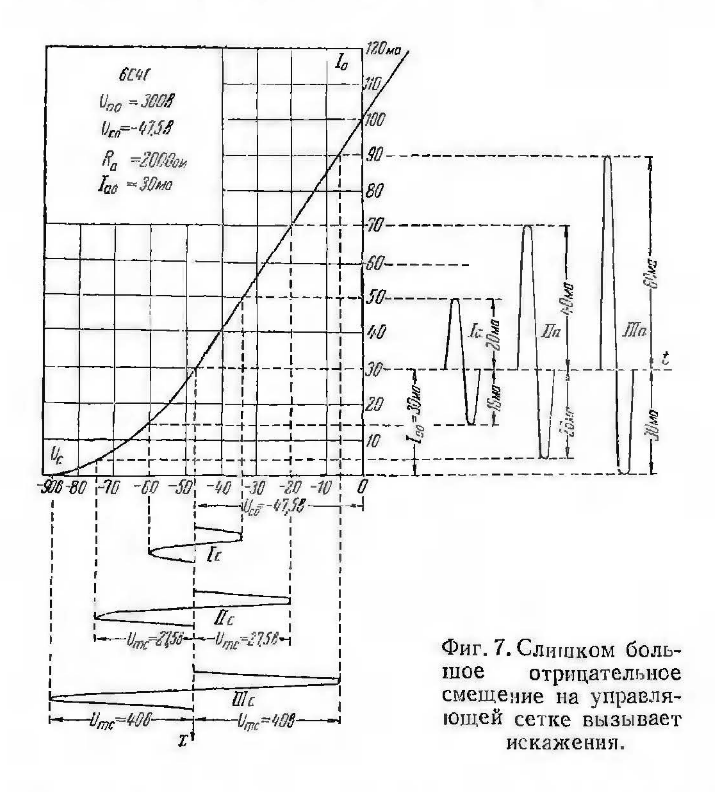


Фиг. 6. Недостаточное отрицательное смещение на управляющей сетке приводит к возникновению искажения кривой анодного тока.

возрастает постоянная составляющая анодного тока I_{a0}, а вместе с тем увеличивается и мощность, рассеиваемая на аноде лампы. При недостаточном смещении анодный ток может сделаться настолько большим, что мощность, рассеиваемая на аноде лампы, превысит максимальную допустимую для нее величину, анод лампы сильно накалится, и лампа выйдет из строя.

Искажения при чрезмерно большом смещении на сетке. При чрезмерно большом отрицательном смещении на сетке

($-U_{c0}$) также возникают нелинейные искажения. Так, например, при $U_{c0} = -47{,}5$ *в* (фиг. 7) получается заход на нижний сгиб характеристики, а если амплитуды переменного напряжения в цепи сетки будут велики, — даже полное прекращение анодного тока в некоторые моменты (в этом случае говорят, что лампа работает с нижней отсечкой анодного тока). В результате изменения анодного



Фиг. 7. Слишком большое отрицательное смещение на управляющей сетке вызывает искажения.

тока будут непропорциональны изменениям сеточного напряжения и кривая анодного тока будет искажена. При этом постоянная составляющая анодного тока при подаче на управляющую сетку лампы переменного напряжения возрастет по сравнению с постоянной составляющей тока при отсутствии переменного напряжения (по сравнению с током покоя). Это явление легко может быть обнаружено с помощью магнитоэлектрического миллиамперметра, включенного в анодную цепь лампы.

Пользуясь фиг. 7, посмотрим, почему это так получается. Как видно из этой фигуры, при напряжении смещения U_{c0}, равном — 47,5 *в*, анодный ток покоя I_{a0} равен 30 *ма*. В момент отрицательного амплитудного значения напряжения на управляющей сетке $U_{mc} = 27{,}5$ *в* анодный ток уменьшается до 4 *ма*, т. е. на 26 *ма*, а в момент положительного амплитудного значения ток в цепи анода возрастает до 70 *ма*, т. е. на 40 *ма* (кривые *IIc* и *IIa*). Следующие одно за другим с частотой переменного тока увеличения тока на 40 *ма* будут сильнее действовать на стрелку прибора, чем происходящие между ними уменьшения тока на 26 *ма*. В результате стрелка прибора при наличии переменного напряжения в цепи сетки и даст большее отклонение, чем при отсутствии этого напряжения. Отклонение ее будет тем больше, чем больше будет амплитуда напряжения на сетке.

Обратное явление будет иметь место при недостаточном смещении на сетке. В этом случае при действии переменного напряжения в цепи сетки уменьшение анодного тока больше, чем его увеличение (см. фиг. 6), поэтому получается уменьшение отклонения стрелки миллнамперметра по сравнению с ее отклонением при отсутствии переменного напряжения.

Если подать на сетку лампы переменное напряжение, амплитуда которого будет все время изменяться (что имеет место, например, при усилении радиотелефонной передачи), то отношение увеличения анодного тока к его уменьшению в обоих случаях будет непрерывно изменяться и стрелка измерительного прибора все время будет колебаться.

Таким образом, по характеру изменений анодного тока во время подачи переменного напряжения на сетку можно определить, когда постоянное смещение на ней велико и когда оно недостаточно. Этим способом можно также получить представление о наличии и относительной величине нелинейных искажений, вносимых лампой, так как чем в бо́льших пределах будут изменяться показания миллиамперметра, тем больше искажения. Неподвижное же положение стрелки миллиамперметра при изменениях амплитуды переменного напряжения на сетке лампы указывает на то, что увеличения и уменьшения анодного тока практически одинаковы и нелинейные искажения, вносимые усилительной лампой, невелики.

Основное условие усиления без искажений. Из вышеизложенного можно сделать вывод, что основным условием

отсутствия искажений при усилении с помощью электронной лампы является работа на прямолинейном участке ее характеристики и только в области отрицательных напряжений на сетке.

Такой режим работы лампы носит название *режима класса А*. Отрицательное смещение на сетку обычно выбирается таким образом, чтобы ток в анодной цепи лампы при отсутствии переменных напряжений в сеточной цепи (ток покоя) был несколько больше половины анодного тока при нулевом напряжении на управляющей сетке. При этом на сетку электронной лампы можно подавать напряжения с бóльшими амплитудами, чем при любом другом напряжении смещения, а следовательно, получить без искажений наибольшие амплитуды анодного тока.

Для каждого рабочего анодного напряжения данной лампы рекомендуется определенное смещающее напряжение на сетке. Однако известно, что небольшие изменения формы кривой не создают заметных на слух искажений. Поэтому, для того чтобы получить бóльшую громкость передачи, иногда допускают заход амплитуды на нижний сгиб характеристики, а также небольшой заход в область положительных напряжений на сетке.

Искажения, вносимые пентодами и лучевыми тетродами. Лучевые тетроды и пентоды, особенно подогревные, применяемые в оконечных ступенях усилителей н. ч., строго говоря, не имеют прямолинейных частей на своих анодно-сеточных характеристиках. Их характеристики имеют довольно заметную кривизну по всей длине. В связи с этим увеличения и уменьшения анодного тока от действия переменного напряжения в цепи управляющей сетки бывают заметно неравными и искажения при больших амплитудах сеточного напряжения могут быть весьма значительными. Как правило, искажения, вносимые пентодами и лучевыми тетродами, всегда больше искажений, вносимых трехэлектродными лампами при той же отдаваемой мощности и том же анодном напряжении. Для получения возможно меньших нелинейных искажений в оконечной ступени с пентодом или лучевым тетродом особое значение имеет правильный выбор анодного нагрузочного сопротивления и величины постоянного отрицательного смещения на управляющей сетке.

Лампа с трансформатором или дросселем в анодной цепи. Условия работы лампы в оконечной ступени или в ступени предварительного усиления с дросселем или трансфор-

матором отличаются от описанных условий работы с сопротивлением в анодной цепи. Первичная обмотка трансформатора или обмотка дросселя, включенная в анодную цепь лампы, обладает относительно малым активным сопротивлением, на ней имеет место относительно небольшое падение постоянного напряжения, и поэтому при отсутствии переменного напряжения н. ч. на управляющей сетке напряжение на аноде лампы почти равно напряжению источника анодного питания. Однако для переменной составляющей анодного тока обмотка трансформатора или дросселя представляет значительно большее сопротивление и на ее концах получается значительное переменное напряжение н. ч. Это переменное напряжение складывается с напряжением источника анодного питания, и в результате во время положительного полупериода напряжения на управляющей сетке на аноде лампы получается результирующее напряжение меньше напряжения источника анодного питания, а во время отрицательного полупериода это результирующее напряжение превышает напряжение источника анодного питания.

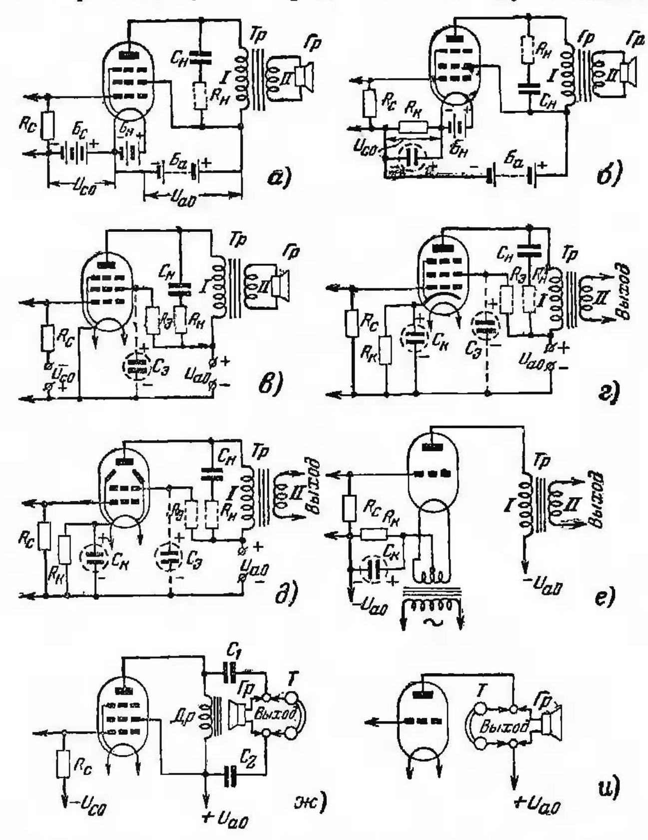
В заключение этого раздела необходимо отметить, что выводы о недопустимости больших искажений кривой анодного тока справедливы для всякой ступени усиления н. ч. с триодом, лучевым тетродом или пентодом, за исключением так называемой двухтактной ступени, о работе которой мы будем говорить ниже особо.

6. ОКОНЕЧНАЯ СТУПЕНЬ

В анодные цепи оконечных ступеней большинства современных усилителей н. ч. включены первичные обмотки *I* так называемых *выходных трансформаторов Тр*, имеющих сердечники из стальных пластин (фиг. 8,*а*—*е*). Нагрузки усилителей — громкоговорители, линии радиотрансляционных сетей, звукозаписывающие головки и другие потребители отдаваемой усилителями мощности — присоединяются к вторичным обмоткам *II* этих трансформаторов. Пульсирующий анодный ток, возникший от действия переменного напряжения н. ч. в цепи управляющей сетки лампы, проходя по первичной обмотке трансформатора, индуктирует в его вторичной обмотке э. д. с., которая создает в свою очередь переменный ток той же частоты через нагрузку.

Только в оконечных ступенях, отдающих небольшую мощность (порядка долей ватта), когда в них работают

лампы с небольшим анодным током, для упрощения схемы применяется включение электромагнитного телефона или громкоговорителя *Гр* непосредственно между анодом лампы



Фиг. 8. Типовые схемы оконечных ступеней усилителей н. ч.

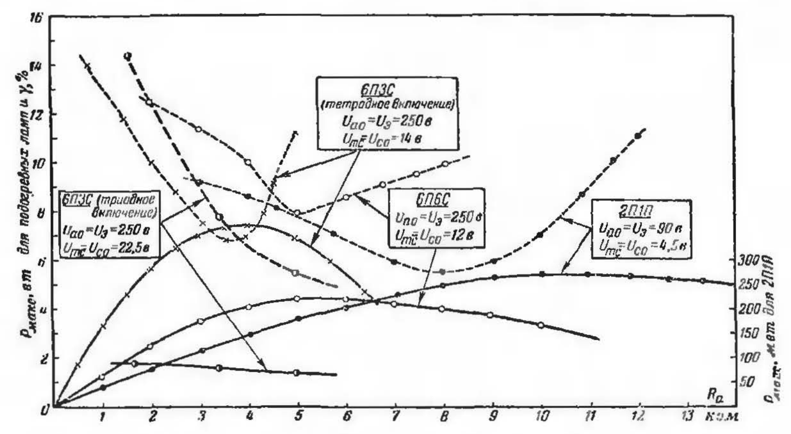
а—ступень с пентодом прямого накала питаемая от батарей, смещение фиксированное; *б*—то же, смещение автоматическое; *в*—ступень с подогревным пентодом, смещение фиксированное; *г*—то же, смещение автоматическое; *д*—ступень с подогревным лучевым тетродом, смещение автоматическое; *е*—ступень с триодом прямого накала, питание накала переменным током, смещение автоматическое; *ж*—ступень с дроссельным выходом; *и*—ступень с непосредственным включением в анодную цепь телефона или громкоговорителя.

и положительным полюсом источника анодного питания (фиг. 8,*и*).

В некоторых усилителях в анодную цепь лампы оконечной ступени включается дроссель *Др* с сердечником из стальных пластин (фиг. 8,*ж*), а телефон или громкоговори-

тель присоединяются к концам его обмотки через конденсаторы C_1 и C_2. В такой схеме пульсирующий анодный ток проходит через обмотку дросселя, образуя на нем переменную составляющую напряжения н. ч., которая создает через конденсаторы C_1, C_2 и громкоговоритель (или телефон) переменный ток н. ч.

Выбор ламп для оконечных ступеней. В оконечных ступенях современных усилителей н. ч. обычно применяются специально предназначаемые для них пентоды или лучевые тетроды, так как они требуют меньших напряжений н. ч. в цепях управляющих сеток для получения тех же мощно-



Фиг. 9. Зависимость коэффициента нелинейности γ и мощности $P_{макс}$ от сопротивления анодной нагрузки R_a.

стей по сравнению с трехэлектродными лампами. Для усилителей с батарейным питанием выпускаются пентоды прямого накала, а для усилителей, питаемых от электросетей,— подогревные лучевые тетроды и пентоды.

В табл. 2 приведены данные некоторых отечественных ламп для оконечных ступеней и режимы их работы. По этой таблице можно выбрать лампу для оконечной ступени в зависимости от требуемой выходной мощности. Мощность, которую можно получить на вторичной обмотке выходного трансформатора оконечной ступени с данной лампой, составляет 70—85% указанной в таблице; остальная мощность теряется бесполезно в обмотках и в сердечнике выходного трансформатора. На фиг. 9 приведены кривые, показывающие, как изменяются мощности (сплошные ли-

нии), отдаваемые лампами, и коэффициент нелинейности (пунктирные линии) при изменении величин нагрузочных сопротивлений.

Из сопоставления приведенных в табл. 2 данных триодов с данными лучевых тетродов и пентодов видно, что применение лучевых тетродов в оконечных ступенях наиболее выгодно. Так, например, триод 6С4С при анодном напряжении 250 *в* отдает мощность 3,5 *вт* при подаче на его управляющую сетку напряжения н. ч. с амплитудой $U_{mc} = 45$ *в*, потребляя от источника анодного питания ток 60 *ма*. Лучевой тетрод 6П6С при том же анодном напряжении может отдать мощность 4,25 *вт*, когда на его управляющую сетку подано напряжение н. ч. с амплитудой, почти в четыре раза меньшей ($U_{mc} = 12,5$ *в*); при этом общий ток цепей анода и экранной сетки не превышает 50 *ма*.

Необходимость в выходном трансформаторе. Выясним, почему электродинамический громкоговоритель всегда включается с трансформатором. Как видно из табл. 2, большинство электронных ламп, предназначенных для использования в оконечных ступенях усилителей н. ч., отдает максимальную мощность при величинах нагрузочного сопротивления R_a порядка нескольких килоом. При этом амплитуды переменных составляющих анодных токов не превышают нескольких десятков миллиампер. Звуковые же катушки электродинамических громкоговорителей имеют сопротивление всего по нескольку ом, а для нормального звучания громкоговорителей через их катушки нужно пропускать ток с амплитудой иногда до нескольких ампер, но при напряжении всего лишь в несколько вольт. Если такую звуковую катушку включить непосредственно в анодную цепь лампы, то проходящий через нее пульсирующий ток отдаст ей ничтожную мощность, и громкоговоритель будет звучать чрезвычайно слабо. Если же в анодную цепь лампы включить первичную обмотку трансформатора, количество витков вторичной обмотки w_{II} которого в определенное число раз меньше количества витков первичной w_I, то амплитуда тока в цепи вторичной обмотки (через звуковую катушку электродинамического громкоговорителя) будет примерно во столько раз больше, во сколько раз меньше витков имеет вторичная обмотка по сравнению с первичной. Напряжение на вторичной обмотке в такое же число раз будет меньше переменной составляющей напряжения на первичной обмотке. В результате увеличения тока

Электронные лампы, применяемые в оконечных ступе

Обозначение	Тип лампы	Напряжение накала $U_н$, в	Ток накала $I_н$, а	Напряжение источника анодного питания U_{a0}, в	Напряжение на экранной сетке $U_{э0}$, в
2П1П	Пентод прямого накала	1,2	0,06	67,5	67,5
			0,12	67,5	67,5
			0,06	90	67,5
			0,12	90	67,5
			0,12	90	90
4П1Л	Пентод прямого накала	2,1	0,65	120	120
				160	160
				200	160
				240	160
				160	—
				160	—
				200	—
				240	—
6Ф6С	Пентод подогревный	6,3	0,7	250	250
				315	315
				250	—
6П6С	Лучевой тетрод подогревный	6,3	0,45	180	180
				250	250
				315	225
6П3С	Лучевой тетрод подогревный	6,3	0,9	250	250
				250	250
				300	200
				300	200
				375	125
				375	125
				250	—
				250	—
6П1П	Лучевой тетрод подогревный	6,3	0,45	250	250
6П9	Пентод подогревный	6,3	0,65	300	150
6С4С	Триод прямого накала	6,3	1,0	250	—
УО-186	Триод прямого накала	4	1	240	—
				240	—
				320	—
				320	—
				400	—
				400	—
ГМ-57	Триод прямого накала	4	2	500	—
				600	—
				700	—
				750	—
				800	—

Примечания. 1. Включена одна половина нити накала.
2. Обе половины нити накала соединены параллельно.
3. Работа в схеме с фиксированным смещением.
4. Работа в схеме с автоматическим смещением от сопротивления $R_к$ в цепи катода.

нях усилителей н. ч. и типовые режимы их работы

Смещение на управляющей сетке U_{c0}	Амплитуда напряжения на управляющей сетке U_{mc}	Сопротивление смещения в цепи катода $R_к$	Анодный ток I_{a0}	Ток экранной сетки $I_{э0}$	Крутизна характеристики S	Внутреннее сопротивление R_i	Оптимальное нагрузочное сопротивление R_a	Максимальная отдаваемая мощность $P_{макс}$	Коэффициент нелинейности γ при $R_{макс}$	Примечания
в	*в*	*ом*	*ма*	*ма*	*ма/в*	*ком*	*ком*	*вт*		
—3,5	3,5	—	2,8	0,65	0,9	260	24	0,06	7	1; 3
—3,5	3,5	—	5,6	1,3	1,8	120	12	0,12	7	2; 3
—3,5	3,5	—	2,9	0,65	0,9	300	36	0,08	7	1; 3
—3,5	3,5	—	5,8	1,3	1,8	150	18	0,16	7	2; 3
—4,5	4,5	—	9,5	2,1	2,15	100	10	0,27	7	2; 3
—6,4	6,4	—	25	4	6	—	6	1,0	7	2; 3
—8,5	8,5	—	40	6			5	1,8	7	2; 3
—9,1	9,1	—	37	5			6	2,4	7	2; 3
—10,2	10,2	—	31	4			7	2,6	7	2; 3
—13,1	13,1	—	26	—	6,5	—	2,5	0,8	7	2; 3; 5
—13,1	13,1	—	26	—			5	0,6	4	2; 3; 5
—17,5	17,5	—	30	—			2,5	1,4	7	2; 3; 5
—22,0	22,0	—	36	—			3,3	2,1	7	2; 3; 5
—16,5	16,5	410	34,0	6,5	2,5	80	7	3,0	8	4
—22,0	22,0	440	42,0	8,0	2,65	75	7	5,0	7	4
—20,0	20,0	650	31,0	—	2,7	2,6	4	0,85	5	6
—8,5	8,5	—	29	3	3,7	58	5,5	2	8	3
—12,5	12,5	—	45	4,5	4,1	52	5	4,25	6	3
—13,0	13,0	—	34	2,2	3,75	77	8,5	5,6	12	3
—14	14	—	72	5	6,0	22,5	2,5	6,5	10	3
—	14	170	75	5,4			2,5	6,5	10	4
—12,5	12,5	—	48	2,5			4,5	6,5	11	3
—	12,5	220	51	3			4,5	6,5	11	4
—9	8,0	—	24	0,7			14	4,2	9	3
—	8,5	365	24	0,7			14	4	9	4
—20	20	—	40	—	4,7	1,7	5	1,4	5	5
—	20	490	40	—			6	1,3	6	6
—12,5	12,5	—	45	5	4,5	50	5	4,5	7	3
—3	3	—	30	7	11,7	130	10	3	7	3
—45	45	750	60	—	5,25	0,8	2,5	3,5	6	4
—33	33	—	62	—	3,1	1,2	2	1,5	4,4	3
—	33	425	62	—			2	1,5	3,7	4
—60	60	—	47	—			4	3,2	5,0	3
—	60	1 030	47	—			5	2,9	3,9	4
—85	85	—	37	—			8	4,0	4,2	3
—	85	1 830	37	—			9	3,9	4,6	4
—40	40	—	70	—	7,0	1,1	3	6,4	5	3
—55	55	—	70	—			4	10,5	5	3
—65	65	—	70	—			5	14,4	5	3
—72	72	—	70	—			6	15,6	5	3
—78	78	—	60	—			6	16,5	5	3

5. Триодное включение; работа в схеме с фиксированным смещением; в графе „Анодный ток" указан суммарный ток анода и экранной сетки.

6. Триодное включение; работа в схеме с автоматическим смещением от сопротивления $R_к$ в цепи катода.

через звуковую катушку электродинамического громкоговорителя последний будет звучать громче.

При данных величинах сопротивления нагрузки $r_н$, подключенной ко вторичной обмотке (например, сопротивления звуковой катушки динамического громкоговорителя), и оптимальном анодном сопротивлении лампы R_a (см. табл. 2) трансформатор должен иметь коэффициент трансформации (отношение числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки)

$$n=\frac{w_{II}}{w_I}=\sqrt{\frac{r_н}{R_a\eta}}, \qquad (10)$$

где η—к. п. д. трансформатора, т. е. коэффициент, учитывающий наличие потерь энергии в его обмотках и в сердечнике.

Из этой формулы следует, что трансформатор с нагрузкой, подключенной к его вторичной обмотке, представляет собой для анодной цепи лампы сопротивление величиной

$$R_a=\frac{r_н}{n^2\eta}. \qquad (a)$$

Если пренебречь в этой формуле величиной η, т. е. потерями в трансформаторе, мы можем написать:

$$R_a=\frac{r_н}{n^2}, \qquad (б)$$

т. е. величина нагрузочного сопротивления анодной цепи лампы приблизительно в $\frac{1}{n^2}$ раз больше величины нагрузочного сопротивления, присоединенного к вторичной обмотке трансформатора.

Объясним физический смысл такого «пересчета» сопротивления нагрузки вторичной обмотки трансформатора в цепь его первичной обмотки. Допустим для простоты рассуждений, что в выходном трансформаторе нет потерь, т. е. сопротивления его обмоток равны нулю и сердечник не поглощает энергии, а его первичная обмотка обладает очень большой индуктивностью. Когда нагрузка не включена на вторичную обмотку, тока в этой обмотке не будет и первичная обмотка будет представлять собой идеальный дроссель — она не будет пропускать через себя переменную составляющую анодного тока лампы. Через нее практически будет итти только постоянный анодный ток. Но при

включении нагрузки на вторичную обмотку через нее пойдет ток. В первичной обмотке также появится переменная составляющая тока. Уменьшение сопротивления нагрузки вызовет увеличение токов как во вторичной, так и в первичной обмотке. Это произойдет потому, что ток, проходящий по виткам вторичной обмотки, создает в сердечнике магнитные силовые линии, направленные навстречу силовым линиям, образуемым током первичной обмотки. В результате ослабления магнитного потока в сердечнике э. д. с. самоиндукции первичной обмотки уменьшается и переменная составляющая тока в ней возрастает. Это явление по физическому смыслу равноценно уменьшению сопротивления первичной обмотки для переменной составляющей анодного тока.

Найдем количественную зависимость сопротивления трансформатора переменному току со стороны первичной обмотки. Известно, что ток первичной обмотки I_{I} в $\frac{1}{n}$ раз меньше тока вторичной обмотки I_{II}, а напряжение первичной обмотки U_{I} в $\frac{1}{n}$ раз больше напряжения вторичной обмотки U_{II}. Запишем это в виде формул:

$$I_{I}=I_{II}n; \quad U_{I}=\frac{U_{II}}{n}. \qquad \text{(в)}$$

Зная напряжение U_{I}, существующее на концах цепи (в данном случае на концах первичной обмотки), и проходящий по ней ток I_{I}, можно найти сопротивление этой цепи

$$z_{I}=\frac{U_{I}}{I_{I}}. \qquad \text{(г)}$$

Подставляя в последнюю формулу (г) вместо U_{I} и I_{I} равные им величины из формулы (в), получим, что

$$z_{I}=\frac{U_{II}}{I_{II}n^2}. \qquad \text{(д)}$$

Но отношение напряжения на нагрузке к току в ней $\frac{U_{II}}{I_{II}}$ представляет собой сопротивление нагрузки $r_н$. Следовательно,

$$z_{I}=\frac{r_н}{n^2}. \qquad \text{(е)}$$

Так как величина z_1 представляет собой анодную нагрузку лампы R_a, следовательно, формула (е) тождественна формуле (б).

Выходной трансформатор для нескольких электродинамических громкоговорителей. В некоторых случаях встречается необходимость включать на выход усилителя н. ч. два или большее число электродинамических громкоговорителей. Если все эти громкоговорители одинаковые, то их звуковые катушки можно включить параллельно между собой и подключить к общей вторичной обмотке выходного трансформатора. В этом случае при расчете коэффициента трансформации выходного трансформатора по формуле (10) величина сопротивления нагрузки $r_н$ должна быть принята равной сопротивлению звуковой катушки каждого из динамических громкоговорителей, деленному на общее число их. (Можно, конечно, звуковые катушки одинаковых динамических громкоговорителей включить последовательно; в этом случае сопротивление нагрузки нужно принимать равным сопротивлению звуковой катушки каждого из громкоговорителей, умноженному на число их.)

Если же на выход усилителя н. ч. нужно включить несколько электродинамических громкоговорителей разной мощности, имеющих различные сопротивления звуковых катушек, то выходной трансформатор должен иметь столько вторичных обмоток, сколько включается громкоговорителей. В этом случае коэффициенты трансформации n_m относительно каждой (m-й) вторичной обмотки, имеющей число витков w_m, следует вычислять по формуле

$$n_m = \frac{w_m}{w_1} = \sqrt{\frac{r_m P_m}{R_a P_{макс} \eta}}. \qquad (10')$$

где $P_{макс}$ — максимальная мощность, отдаваемая лампой оконечной ступени;

P_m — мощность, потребляемая громкоговорителем, включенным на данную вторичную обмотку;

r_m — сопротивление звуковой катушки этого громкоговорителя.

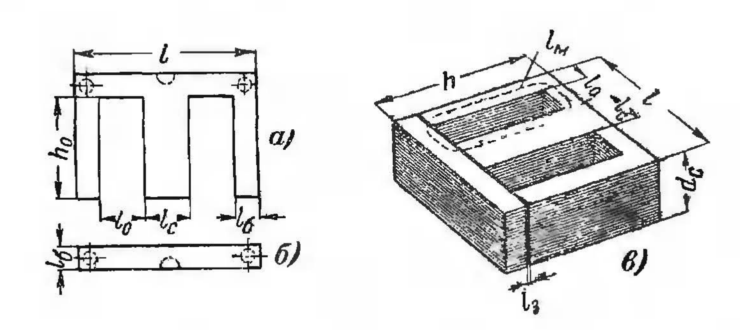
Конструкции выходных трансформаторов. Для передачи энергии из анодной цепи оконечной ступени на громкоговоритель или иную нагрузку с возможно меньшими потерями и без дополнительных искажений должны быть правильно

выбраны геометрические размеры сердечника выходного трансформатора, величина его воздушного зазора, диаметры проводов и числа витков обмоток. Воздушный зазор предохраняет сердечник от насыщения магнитными силовыми линиями вследствие подмагничивания его постоянным током, текущим по первичной обмотке.

Число витков первичной обмотки и размеры сердечника выходного трансформатора выбираются с таким расчетом, чтобы индуктивное сопротивление этой обмотки для низшей частоты полосы пропускания было значительно больше сопротивления нагрузки, «пересчитанного» в цепь первичной обмотки $\left(\frac{r_н}{n^2}\right)$. Этим обеспечивается, что при выбранной низшей частоте индуктивное сопротивление первичной обмотки будет незначительно шунтировать нагрузку и усиление при этой частоте не уменьшится значительно по сравнению с усилением на средних частотах полосы пропускания. Как известно, с повышением частоты индуктивное сопротивление всякой обмотки увеличивается, и поэтому на средних частотах оно будет по сравнению с «пересчитанным» сопротивлением нагрузки настолько велико, что шунтирующее действие индуктивности первичной обмотки вообще можно не принимать во внимание. Таким образом, достаточно большая индуктивность первичной обмотки обеспечивает относительно небольшое падение усиления на низшей частоте по сравнению со средними частотами усиливаемой полосы.

Сердечники трансформаторов. Выходные трансформаторы чаще всего выполняются на сердечниках из Ш-образных пластин (фиг. 10), изготовленных из листов трансформаторной стали толщиной 0,35 *мм*, и пластинок-перемычек к ним из того же материала. Такие сердечники называются Ш-образными или броневыми. Кроме изображенных на фигуре пластин без отверстий выпускаются также пластины такой же формы, но с отверстиями, через которые пропускаются болты, стягивающие сердечник. Наименование пластины состоит из буквы Ш и числа, указывающего ширину ее среднего выступа в миллиметрах. Так, например, Ш-образная пластина с шириной среднего выступа 18 *мм* имеет обозначение Ш-18. Толщина набора (пакета) пластин сердечника обычно берется равной или большей, чем ширина средней части Ш-образной пластины. В табл. 3 даны размеры ряда типовых пластин для сборки трансформаторов.

Каркасы и обмотки. Каркасы для обмоток изготовляются из плотного картона, гетинакса или другого листового изоляционного материала (фиг. 11), толщина которого выбирается главным образом из соображений механической прочности. Для средней прямоугольной трубки обычно бывает достаточной толщина стенки в 1 *мм*. Боковые щечки каркаса делаются такой же толщины. Длина каркаса $h_к$ должна быть примерно на 1 *мм* меньше высоты окна сер-



Фиг. 10. Сердечник броневого типа.
а — Ш-образная пластина; *б* — перемычка; *в* — сердечник, собранный с зазором.

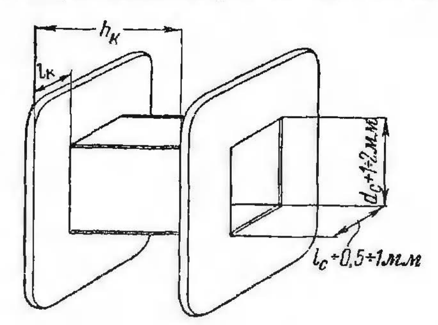
дечника $h_о$, а высота его щечек $l_к$ на 1 *мм* меньше ширины окна сердечника $l_о$. Ширину окна каркаса делают примерно на 0,5—1,0 *мм* больше ширины среднего выступа Ш-образной пластины, а высоту окна — на 1,5—2 *мм* больше толщины набора пластин сердечника (иначе при сборке трудно будет вложить в окно каркаса все пластины). Каркас покрывают изоляционным (например, бакелитовым) лаком.

Между обмотками прокладывают два-три слоя тонкого полотна, пропитанного изоляционным лаком, или плотной, но не толстой бумагой, пропитанной парафином или изоляционным лаком. Между слоями одной и той же обмотки рекомендуется прокладывать по одному слою тонкой пропарафинированной бумаги. Такие прокладки улучшают изоляцию между слоями и облегчают возможность аккуратной намотки следующих слоев.

Выводы первичной обмотки делаются гибкими изолированными проводниками с сечением не меньше сечений обмоточных проводов. Выводы вторичной обмотки обычно

осуществляются тем же проводом, из которого она намотана.

Катушку трансформатора после намотки обычно пропитывают изоляционным веществом. Это мероприятие удлиняет срок ее службы и предохраняет от пробоя. Лучшим пропиточным веществом является смесь, состоящая из 95% церезина и 5% чистого вазелина. Каркас с обмотками просушивается и опускается в расплавленную, но ни в коем случае не кипящую, смесь. В процессе пропитки каркас поворачивается. Когда прекратится выделение пузырьков воздуха из катушки, ее вынимают и дают стечь излишней смеси. Чтобы каркас в процессе пропитки и во время сушки не покоробился, его следует на это время зажать между двумя дощечками, туго связывая их между собой обмоткой из шпагата или проволоки.



Фиг. 11. Каркас для обмоток трансформатора.

Сборка сердечников. Сборка сердечника трансформатора заключается в том, что в окно его каркаса с одной стороны закладываются средние выступы Ш-образных пластин. На концы их пакета накладывается бумажная прокладка и поверх нее пакет из пластинок-перемычек. Скрепление пластин сердечника производится с помощью металлической обоймы (фиг. 12) или болтов с гайками.

Расчет сердечника и обмоток. Расчет выходного трансформатора ведется в следующем порядке.

Сначала определяется необходимая индуктивность его первичной обмотки в генри по формуле

$$L_I = L_0 \frac{R_i R_a}{R_i + R_a}. \qquad (11)$$

Вспомогательный коэффициент L_0 находят из графика фиг. 13 по заданной низшей частоте полосы пропускания $f_{низ}$ и допустимому уменьшению усиления на этой частоте в децибелах (обычно допускают уменьшение усиления не более чем на 1—2 *дб*).

ТАБЛИЦА 3

Типовые Ш-образные пластины и сердечники для трансформаторов и дросселей н. ч.

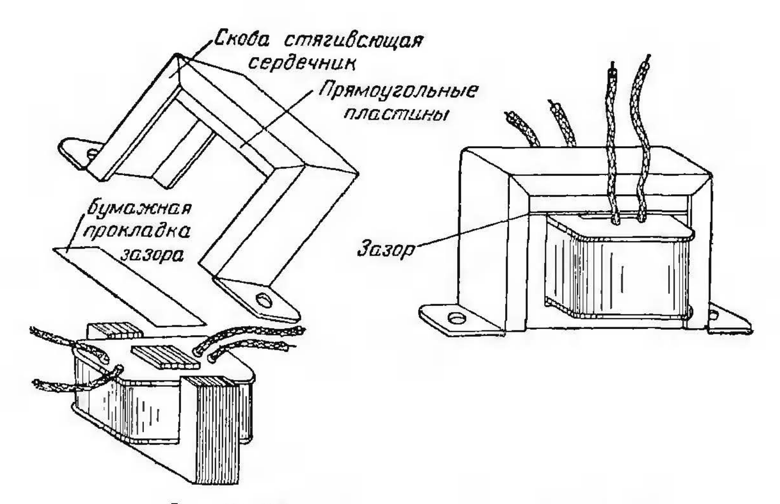
Тип пластин	Ширина среднего выступа l_c	Окно			Средняя длина магнитной силовой линии $l_м$	Типовые пакеты				Средняя длина одного витка обмоток $l_в$	Ширина боковых выступов и перемычек $l_б$	Габаритные размеры	
		ширина l_o	высота h_o	площадь Q_o		толщина d_c	чистое сечение стали в среднем выступе Q'_c	общий объем стали V_c	параметр $\sqrt{\frac{l_м}{Q'_c}}$			ширина (длина перемычки) l	высота h
	мм	*мм*	*мм*	*см²*	*см*	*мм*	*см²*	*см³*		*см*	*мм*	*мм*	*мм*
Ш-10	10	5	15	0,75	5,57	10	0,88	5,3	2,51	5,5	5	30	25
		5	15	0,75	5,57	15	1,32	7,9	2,05	6,5	5	30	25
		5	15	0,75	5,57	20	1,76	10,6	1,78	7,5	5	30	25
		6,5	18	1,17	5,66	10	0,88	7,8	2,53	5,85	6,5	36	31
		6,5	18	1,17	5,66	15	1,32	11,6	2,06	6,85	6,5	36	31
		6,5	18	1,17	5,66	20	1,76	15,6	1,79	7,85	6,5	36	31
		12	36	4,32	10,1	15	1,32	17,7	2,76	8,4	6	46	48
		12	36	4,32	10,1	25	2,20	29,6	2,15	10,4	6	46	48
Ш-12	12	6	18	1,08	6,68	12	1,27	9,1	2,30	6,5	6	36	30
		6	18	1,08	6,68	18	1,90	13,6	1,88	7,7	6	36	30
		6	18	1,08	6,68	24	2,54	18,2	1,62	8,9	6	36	30
		8	22	1,76	6,74	12	1,27	13,9	2,32	7,0	8	44	38
		8	22	1,76	6,74	18	1,90	20,1	1,89	8,2	8	44	38
		8	22	1,76	6,74	24	2,54	27,8	1,63	9,4	8	44	38
		16	48	7,68	12,6	18	1,90	36,5	2,56	10,7	8	60	64
		16	48	7,68	12,6	30	3,17	61,0	1,99	13,1	8	60	64
Ш-14	14	7	21	1,47	7,8	14	1,73	14,5	2,12	7,6	7	42	35
		7	21	1,47	7,8	21	2,59	21,8	1,73	9,0	7	42	35
		7	21	1,47	7,8	28	3,45	29,0	1,51	10,4	7	42	34

Ш-14		9	25	2,25	7,92	14	1,73	20,9	2,13	8,24	9	50	43
		9	25	2,25	7,92	21	2,59	31,4	1,75	9,64	9	50	43
		9	25	2,25	7,92	28	3,45	41,9	1,51	11,0	9	50	43
Ш-15	15	13,5	27	3,64	8,35	19	2,42	38,5	1,85	11,0	11	64	49
		13,5	27	3,64	8,35	30	3,82	61,3	1,47	13,3	11	64	49
Ш-16	16	8	24	1,92	8,9	16	2,25	21,7	2,00	8,6	8	48	40
		8	24	1,92	8,9	24	3,38	32,2	1,69	10,2	8	48	40
		8	24	1,92	8,9	32	4,5	43,4	1,40	11,8	8	48	40
		10	28	2,8	9,03	16	2,25	30,0	2,00	9,28	10	56	48
		10	28	2,8	9,03	24	3,38	45,0	1,64	10,9	10	56	48
		10	28	2,8	9,03	32	4,5	60,0	1,42	12,5	10	56	48
Ш-18	18	9	27	2,43	10,0	18	2,85	31,0	1,79	9,8	9	54	45
		9	27	2,43	10,0	27	4,28	45,5	1,53	11,6	9	54	45
		9	27	2,43	10,0	36	5,71	62,0	1,32	13,4	9	54	45
Ш-19	19	12	33,5	4,02	10,6	19	3,18	51,0	1,83	11,0	12	67	57,5
		12	33,5	4,02	10,6	28	4,68	76,0	1,50	12,8	12	67	57,5
		12	33,5	4,02	10,6	38	6,35	102	1,28	14,8	12	67	57,5
		17	46	7,81	14,3	19	3,07	57,1	2,16	13,0	11	75	68
		17	46	7,81	14,3	27	4,36	81,5	1,81	14,6	11	75	68
		17	56	9,52	16,3	19	3,07	62,0	2,32	13,0	11	75	78
Ш-20	20	10	30	3,00	11,1	20	3,52	42,0	1,77	10,9	10	60	50
		10	30	3,00	11,1	30	5,28	63,0	1,46	12,9	10	60	50
		10	30	3,00	11,1	40	7,04	84,0	1,25	14,9	10	60	50
		17	46	7,81	16,2	20	3,48	60,0	2,16	13,4	11	75	68
		17	46	7,81	16,2	30	5,28	90,0	1,76	15,4	11	75	68
		18	30	5,40	10,8	20	3,48	60,0	1,77	13,4	13	82	56
		18	30	5,40	10,8	30	5,18	90,0	1,45	15,4	13	82	56

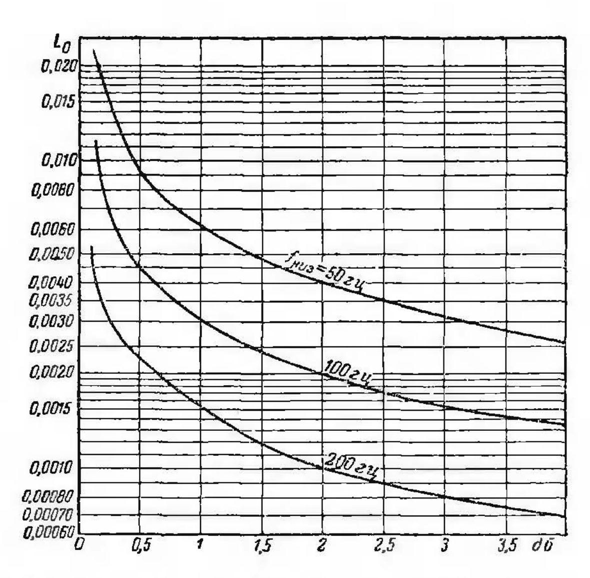
Продолжение табл. 3

Тип пластин	Ширина среднего выступа l_c	Окно			Средняя длина магнитной силовой линии $l_м$	Типовые пакеты				Средняя длина одного витка обмоток $l_в$	Ширина боковых выступов и перемычек $l_б$	Габаритные размеры	
		ширина l_0	высота h_0	площадь Q_0		толщина d_c	чистое сечение стали в среднем выступе Q'_c	общий объем стали V_c	параметр $\sqrt{\frac{l_м}{Q'_c}}$			ширина (длина перемычек) l	высота h
	мм	*мм*	*мм*	*см²*	*см*	*мм*	*см²*	*см³*		*см*	*мм*	*мм*	*мм*
Ш-20		18	56	10,0	15,6	20	3,52	80,0	2,11	13,1	13	82	82
		18	56	10,0	15,6	30	5,28	120	1,72	13,1	13	82	82
		18	56	10,0	15,6	40	7,04	160	1,48	13,1	13	82	82
Ш-21	21	19	38	7,22	11,8	27	4,93	120	1,55	15,8	16	91	70
		19	38	7,22	11,8	43	7,85	181	1,23	19,0	16	91	70
Ш-22	22	14	39	5,46	12,4	22	4,26	80,0	1,70	13,0	14	78	67
		14	39	5,46	12,4	33	6,39	120	1,40	15,2	14	78	67
		14	39	5,46	12,4	44	8,52	160	1,21	17,4	14	78	67
Ш-24	24	12	36	4,32	13,4	24	5,1	72,0	1,62	13,0	12	72	60
		12	36	4,32	13,4	36	7,6	108	1,33	15,4	12	72	60
		12	36	4,32	13,4	48	10,2	144	1,12	17,8	12	72	60
Ш-25	25	25	60	15,0	18,8	25	5,40	137	1,87	17,8	15	105	90
		25	60	15,0	18,8	35	7,44	192	1,59	19,8	15	105	90
		25	60	15,0	18,8	40	8,50	219	1,49	20,8	15	105	90
		25	60	15,0	18,8	50	10,7	274	1,33	22,8	15	105	90
		25	60	15,0	18,8	65	13,9	356	1,17	25,8	15	105	90
		31,5	58	18,2	23,0	25	5,40	152	2,06	19,9	16	120	90

Ш-26	26	13	39	5,07	14,2	26	5,95	100	1,55	14,5	13	78	65
		17	47	7,99	14,7	26	5,95	137	1,57	15,4	17	94	81
		17	47	7,99	14,7	39	8,92	207	1,29	18,0	17	94	81
		17	47	7,99	14,7	52	11,9	274	1,11	20,6	17	94	81
Ш-28	28	14	42	5,88	15,7	28	6,9	116	1,56	15,7	14	84	70
		23,5	50	11,7	19,6	40	9,8	206	1,41	21,0	15	105	80
Ш-30	30	15	45	6,75	16,7	30	7,92	143	1,45	16,4	15	90	75
		15	45	6,75	16,7	45	11,9	215	1,19	19,4	15	90	75
		15	45	6,75	16,7	60	15,8	286	1,02	22,4	15	90	75
		19	53	10,1	16,9	30	7,92	202	1,46	17,6	19	106	91
		19	53	10,1	16,9	45	11,9	303	1,19	20,6	19	106	91
		19	53	10,1	16,9	60	15,8	404	1,03	23,6	19	106	91
		27	54	14,6	18,7	38	10,0	282	1,33	21,9	20	124	94
		27	54	14,6	18,7	60	15,8	446	1,06	26,5	20	124	94
Ш-32	32	16	48	7,68	19,4	32	9,0	173	1,47	17,8	16	96	80
		36	72	25,9	28,4	35	9,9	295	1,69	24,7	18	140	108
Ш-35	35	22	61,5	13,5	19,8	35	10,8	315	1,35	20,4	22	123	105,5
		22	61,5	13,5	19,8	52	16,0	475	1,11	23,8	22	123	105,5
		22	61,5	13,5	19,8	70	21,6	630	0,99	27,4	22	123	105,5
Ш-40	40	20	60	12,0	22,3	40	14,1	336	1,26	22,2	20	120	110
		20	60	12,0	22,3	60	21,1	512	1,03	26,2	20	120	110
		20	60	12,0	22,3	80	28,2	672	0,89	30,2	20	120	110
		30	70	21,0	28,0	40	14,1	400	1,41	25,4	—	—	—
		30	70	21,0	28,0	80	28,2	800	1,00	33,5	—	—	—



Фиг. 12. Сборка выходного трансформатора.



Фиг. 13. График для определения коэффициента L_0 при расчете индуктивности первичной обмотки выходного трансформатора.

Далее находят минимально необходимый объем сердечника в кубических сантиметрах по формуле

$$V_c = \frac{I_{a0}^2 L_I}{D}, \qquad (12)$$

где I_{a0} — постоянная составляющая тока, проходящего через первичную обмотку, *ма*.

Коэффициент D находят из табл. 4 по числу ампервитков подмагничивания aw_0, каковым можно задаться в пределах 4—6*.

ТАБЛИЦА 4

Коэффициенты F и D к формулам для определения объема сердечника и числа витков первичной обмотки трансформатора

aw_0	F	D	aw_0	F	D
1	475	4,4	7	633	122
2	505	16,4	8	650	156
3	530	31,5	9	665	184
4	565	50,5	10	675	220
5	600	71,0	11	680	260
6	610	97,0	12	690	300

Затем по табл. 3 выбирают сердечник с объемом не меньше полученного по формуле (12) и находят по той же таблице площадь его сечения Q_c' и среднюю длину магнитной силовой линии $l_м$. При данном сечении сердечника Q_c' для получения необходимой индуктивности L_I первичная обмотка должна иметь следующее число витков:

$$w_I = F\sqrt{L_I}\sqrt{\frac{l_м}{Q_c'}}. \qquad (13)$$

* Ампервитки подмагничивания характеризуют режим работы сердечника трансформатора, когда через его первичную обмотку течет ток, содержащий постоянную составляющую. Число ампервитков подмагничивания определяется как произведение постоянной составляющей тока в амперах этой обмотки I_{a0} на ее число витков w_I, деленное на среднюю длину магнитной силовой линии $l_м$, т. е.

$$aw_0 = \frac{I_{a0} w_I}{l_м}.$$

Коэффициент F также находят по табл. 4 для выбранного ранее aw_0.

Определив необходимый коэффициент трансформации по приведенной выше формуле (10) (коэффициентам полезного действия можно задаться около 0,7—0,75 при выходной мощности усилителя н. ч. до 5 *вт* и 0,8—0,85 для большей мощности), определяют число витков вторичной обмотки

$$w_{II} = w_I n. \tag{14}$$

Диаметр провода в миллиметрах (по меди) первичной обмотки

$$d_I = 0{,}022 \sqrt{I_{a0}^2 + \frac{I_{ma}^2}{4}}, \tag{15}$$

где I_{a0} — постоянная составляющая анодного тока, *ма*;
I_{ma} — амплитуда переменной составляющей анодного тока, *ма* *.

Диаметр провода вторичной обмотки в миллиметрах (по меди)

$$d_{II} = 0{,}7 \sqrt[4]{\frac{P_{макс}}{r_н}}, \tag{16}$$

После этого нужно проверить возможность размещения обмоток в окне сердечника по формуле

$$l_к h_к \geqslant 1{,}2\,(d_{Iиз}^2 w_I + d_{IIиз}^2 w_{II} + h_к \delta), \tag{17}$$

где $h_к$ и $l_к$ — высота и глубина каркаса, *мм*, измеренные по его внутренним стенкам (см. фиг. 11);
δ — общая толщина прокладок между обмотками и слоями обмоток, *мм*.

Диаметры проводов в изоляции $d_{I\,из}$ и $d_{IIиз}$ первичной и вторичной обмоток определяются по таблицам проводов; коэффициент 1,2 перед скобкой берется при намотке обмотки в слой; при намотке в разброс его нужно взять большей величины (до 2).

---

* Если известна максимальная мощность, отдаваемая лампой, $P_{макс}$ в ваттах и оптимальное нагрузочное сопротивление R_a в омах, амплитуда анодного тока I_{ma} в миллиамперах может быть определена по формуле

$$I_{ma} = 1\,400 \sqrt{\frac{P_{макс}}{R_a}}.$$

Если неравенство (17) не выполняется, значит обмотки не разместятся на каркасе. Тогда нужно задаться при расчете индуктивности первичной обмотки меньшим aw_0, выбрать сердечник с большим Q_o и произвести расчет трансформатора заново.

Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, что числа витков w_m каждой из них и диаметры d_m их проводов вычисляются по формулам (14) и (16), только в формуле (14) величина n заменяется соответствующей величиной n_m, найденной по формуле (10'), а в формулу (16) вместо $P_{макс}$ подставляется величина P_m и вместо $r_н$ величина r_m (см. стр. 50). При проверке возможности размещения обмоток в окне сердечника вместо члена $d_{II\,из}w_{II}$ в сумму, стоящую в скобках формулы (17), нужно ввести аналогичные же члены по числу вторичных обмоток.

Оптимальная толщина прокладки в зазоре Ш-образного сердечника с размерами, выбранными по предыдущим формулам, определяется во всех случаях по формуле

$$l_з = \frac{w_I I_{a0}}{16} \cdot 10^{-5}. \qquad (18)$$

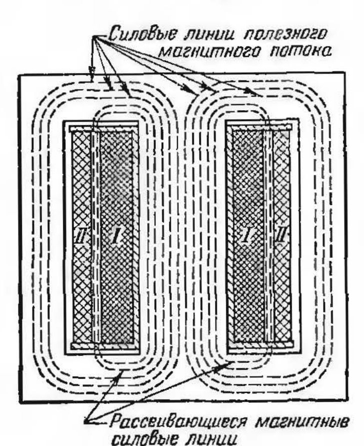
Корректирующий конденсатор. Параллельно первичной обмотке выходного трансформатора *Тр* (см. фиг. 8) оконечной ступени с пентодом или лучевым тетродом обычно включается корректирующий конденсатор $C_к$. Выясним для чего он нужен.

Переменная составляющая анодного тока, проходящего через первичную обмотку трансформатора, создает переменный магнитный поток. Одна часть магнитных силовых линий этого потока охватывает все витки вторичной обмотки, возбуждая в них э. д. с. (фиг. 14). Другая же часть силовых линий магнитного потока, создаваемого витками первичной обмотки, пройдет внутри катушки между первичной и вторичной обмотками, не охватывая витков последней. Это будут так называемые *рассеиваемые* магнитные силовые линии. Точно так же не все магнитные силовые линии, создаваемые током вторичной обмотки, будут охватывать полностью витки первичной обмотки. Наличие этих потоков рассеяния говорит о том, что, в цепях первичной и вторичной обмоток существуют *индуктивности рассеяния,* на которых получается падение переменного напряжения. Эти индуктивности относительно невелики, и для токов

нижних и средних частот полосы пропускания они не представляют значительного сопротивления. Однако для верхних частот сопротивление, создаваемое индуктивностью рассеяния первичной обмотки, достигает довольно большой величины *. Вследствие этого на этих частотах анодное нагрузочное сопротивление пентода или лучевого тетрода не определяется в основном „пересчитанным" сопротивлением нагрузки $\frac{r_н}{n^2}$ — в составе нагрузочного сопротивления появляется существенная индуктивная составляющая и величина полного анодного нагрузочного сопротивления увеличивается по сравнению с оптимальным. Кроме того с повышением частоты возрастает сопротивление звуковой катушки громкоговорителя $r_н$, т. е. увеличивается и величина

$$R_a = \frac{r_н}{n^2 \eta} .$$

Все это может привести к тому, что пентод или лучевой тетрод ступени будет создавать искажения.



Фиг. 14. Магнитные силовые линии рассеяния в трансформаторе.

I — первичная обмотка; II — вторичная обмотка.

Сопротивление конденсатора, как известно, уменьшается с увеличением частоты подведенного к нему переменного напряжения. Поэтому, включая конденсатор $C_н$ (фиг. 8) параллельно первичной обмотке выходного трансформатора, можно выравнять изменения величины анодного нагрузочного сопротивления лампы в пределах усиливаемой полосы частот.

* С целью уменьшения рассеивания магнитных силовых линий можно рекомендовать следующее расположение обмоток трансформатора: сначала наматывается половина витков первичной его обмотки, затем вторичная обмотка и поверх нее остальные витки первичной обмотки.

С той же целью вторичную обмотку можно выполнить из двух частей, одна из которых наматывается под первичной обмоткой, а другая поверх нее. В последнем случае лучшие результаты получатся, если число витков в каждой части вторичной обмотки взято равным расчетному и обе эти части соединены параллельно. Сечение провода частей вторичной обмотки здесь нужно взять вдвое меньше расчетного (диаметр в 1,4 — 1,5 раза меньше расчетного). Очень важно, чтобы числа витков каждой части обмотки были бы строго равными.

Если применить конденсатор $C_н$ емкостью в несколько тысяч пикофарад, его сопротивление для токов нижних частот полосы будет настолько велико, что оно практически не будет создавать добавочной нагрузки для лампы; нагрузочное сопротивление лампы при нижних частотах практически будет определяться только данными трансформатора с электродинамическим громкоговорителем. С увеличением же частоты общее сопротивление анодной нагрузки лампы будет мало изменяться вследствие одновременного увеличения индуктивности рассеяния и сопротивления звуковой катушки и уменьшения сопротивления конденсатора. Поэтому в пределах усиливаемой полосы частот анодное нагрузочное сопротивление лампы при различных частотах будет более постоянным.

Конденсатор $C_н$ должен иметь емкость (в пикофарадах):

$$C_н \approx \frac{(10 \div 30) \cdot 10^6}{R_a}. \qquad (19)$$

Иногда последовательно с конденсатором $C_н$ включают сопротивление величиной, имеющей такой же порядок как R_a.

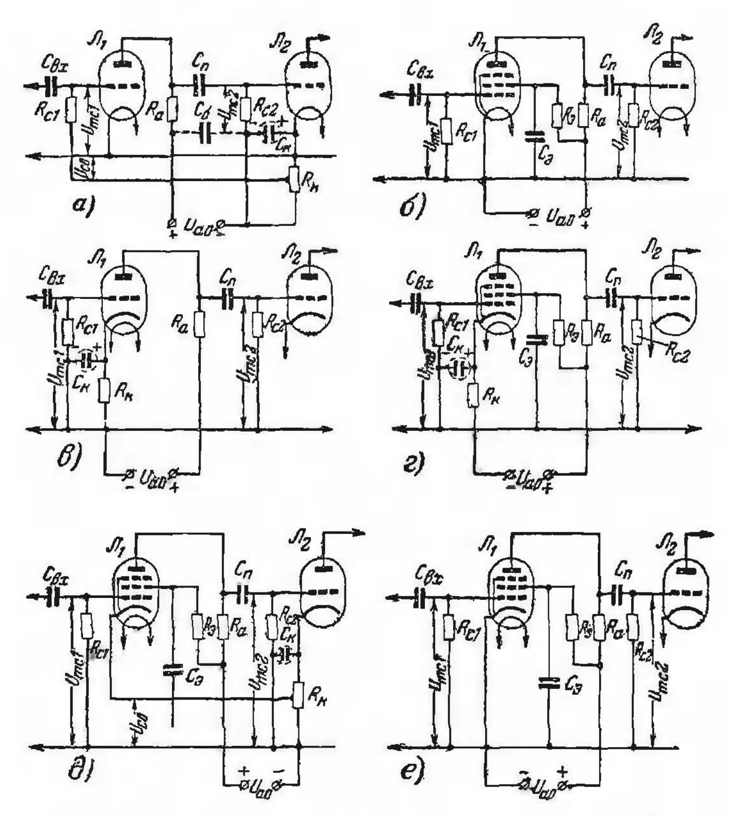
7. СТУПЕНИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЯХ

В ступенях предварительного усиления наиболее распространены схемы на сопротивлениях. Они просты, дешевы и в то же время при правильном выборе деталей обеспечивают равномерное усиление в необходимой полосе частот.

На фиг. 15 показано несколько типовых схем ступеней предварительного усиления на сопротивлениях. Основными деталями такой ступени являются: электронная лампа $Л_1$, включенное в ее анодную цепь сопротивление R_a, конденсатор связи с последующей ступенью $C_п$, носящий также название *переходного* конденсатора, и сопротивление R_{c2}, включенное в цепь управляющей сетки лампы $Л_2$ следующей ступени. В схему с пентодом добавляется сопротивление $R_э$, понижающее напряжение на его экранную сетку. и конденсатор $C_э$, соединяющий экранную сетку с катодом,

Действие схемы. Ступень предварительного усиления на сопротивлениях работает следующим образом. Переменное напряжение н. ч., поступающее в цепь управляющей сетки лампы $Л_1$, вызывает пульсацию ее анодного тока.

Проходя по сопротивлению R_a, пульсирующий ток создает на нем пульсирующее напряжение. Верхний конец сопротивления R_a (анод лампы $Л_1$) соединен с верхним концом сопротивления R_{c2} и с управляющей сеткой лампы $Л_2$ следующей ступени через конденсатор $C_п$, а нижний конец сопротивления R_a соединен через источник анодного пита-



Фиг. 15. Типовые схемы ступеней предварительного усиления на сопротивлениях.

а—ступень с триодом прямого накала, получающим смещение на управляющую сетку от сопротивления $R_к$, включенного в общую цепь минуса анодной батареи; *б*—ступень с пентодом прямого накала, получающим смещение на управляющую сетку за счет поступающего на нее напряжения сигнала; *в*—ступень на подогревном триоде с автоматическим смещением за счет падения напряжения на сопротивлении $R_к$, включенном в цепь катода лампы; *г*—то же, на подогревном пентоде; *д*—ступень на подогревном пентоде с автоматическим смещением от сопротивления $R_к$, включенного в цепь катода лампы оконечной ступени; *е*—ступень на подогревном пентоде, получающем смещение на управляющую сетку за счет поступающего напряжения сигнала.

ния с нижним концом сопротивления R_{c2} (внутреннее сопротивление этого источника обычно очень невелико). При питании усилителя от выпрямителя переменного тока нижние концы сопротивлений R_a и R_{c2} соединены через конденсатор $C_б$ фильтра выпрямителя, включение которого обозначено на фиг. 15,*а* пунктиром. Последний всегда имеет большую емкость и, следовательно, ничтожное сопротивление токам н. ч. Включение конденсатора $C_б$, показанное на фиг. 15,*а*, часто применяется также и при батарейном питании усилителя.

Можно считать, что сопротивление R_{c2} для токов н. ч. включено параллельно сопротивлению R_a. Поэтому переменная составляющая напряжения н. ч., возникшая на сопротивлении R_a, будет действовать также и в цепи управляющей сетки лампы $Л_2$ следующей ступени, в которую включено сопротивление R_{c2}.

Усиление ступени. Число, показывающее, во сколько раз переменное напряжение н. ч. U_{mc2} в цепи сетки лампы $Л_2$ последующей ступени больше переменного напряжения U_{mc1}, поступающего в цепь сетки лампы $Л_1$ данной ступени, определяет ее усиление (коэффициент усиления). Следовательно, усиление ступени на сопротивлениях будет равно:

$$K = \frac{U_{mc2}}{U_{mc1}}. \qquad (20)$$

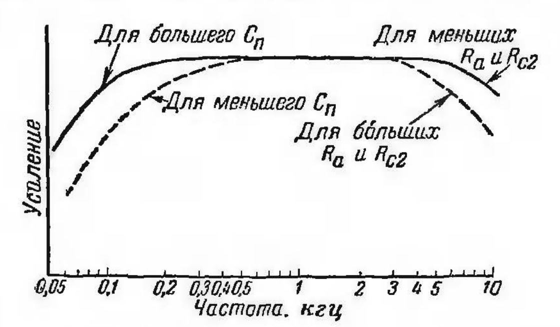
Если, например, от детектора в цепь сетки лампы $Л_1$ поступит переменное напряжение н. ч. с амплитудой 0,1 *в*, а коэффициент усиления предварительной ступени равен 70, то в цепи сетки лампы $Л_2$ следующей ступени получится переменное напряжение с амплитудой $0{,}1 \cdot 70 = 7$ *в*.

Усиление ступени на сопротивлениях зависит от анодного напряжения и от величин входящих в нее сопротивлений. Чем больше R_a и R_{c2} и чем выше анодное напряжение, тем больше коэффициент усиления. Однако практически R_a применяется не более 0,5 *мгом*, а R_{c2} не более 1—3 *мгом*. Напряжение же анодного питания для подогревных ламп допустимо не более 300 *в*.

Кроме того, усиление ступени зависит от смещения на управляющей сетке, а в случае применения пентода и от напряжения на его экранной сетке. Последнее должно быть меньше напряжения источника анодного питания. Поэтому экранная сетка лампы $Л_1$ подключается к положительному

полюсу источника анодного напряжения через сопротивление $R_в$.

От емкости конденсатора $C_п$ зависит равномерность усиления частот в пределах полосы пропускания. Этот конденсатор должен иметь для переменного тока низшей частоты, которая должна быть усилена, емкостное сопротивление значительно меньшее, чем сопротивление R_{c2}. Тогда на конденсаторе $C_п$ при этой частоте будет сравнительно небольшое падение переменного напряжения н. ч. и переменная составляющая напряжения с сопротивления R_a почти полностью поступит в цепь сетки лампы следующей ступени. Для более высоких частот это условие тем более будет выполняться, так как с увеличением частоты емкостное сопротивление конденсатора уменьшается.



Фиг. 16. Частотные характеристики ступени усиления на сопротивлениях.

Частотная характеристика ступени. На фиг. 16 показана типичная частотная характеристика ступени усиления на сопротивлениях. Мы видим, что в своей средней части она почти прямолинейна, т. е. здесь ступень обеспечивает одинаковое усиление различных частот. Понижение усиления на нижних частотах имеет место вследствие возрастания на них емкостного сопротивления конденсатора $C_п$ (см. фиг. 15). С уменьшением частоты падение напряжения на нем увеличивается и меньшая часть переменной составляющей напряжения попадает из анодной цепи лампы $Л_1$ в цепь управляющей сетки лампы $Л_2$ следующей ступени.

„Завал" на верхних частотах (фиг. 16) возникает за счет влияния выходной емкости лампы $Л_1$, входной емкости лампы $Л_2$ и емкости монтажных проводов и деталей схемы по отношению к корпусу усилителя и между собой. Эти

емкости можно рассматривать включенными параллельно активным сопротивлениям R_a, R_{c2} и внутреннему сопротивлению лампы $Л_1$. При относительно низких частотах реактивные сопротивления, определяемые этими емкостями, оказываются значительно больше этих активных сопротивлений, и поэтому с шунтирующим действием этих емкостей можно не считаться. Но с повышением частоты емкостное сопротивление уменьшается и на некоторых частотах реактивное сопротивление, создаваемое внутриламповыми емкостями и монтажом, делается соизмеримым с величинами указанных активных сопротивлений, т. е. шунтирующее действие емкостей начинает сказываться значительно сильнее. В результате на верхних частотах действующие величины сопротивлений анодной цепи лампы $Л_1$ заметно уменьшаются, что ведет к уменьшению усиления на этих частотах.

Чем меньше анодное сопротивление R_a и внутреннее сопротивление лампы $Л_1$, тем при более высоких частотах начинает сказываться влияние этих шунтирующих емкостей.

Так, в ступенях с трехэлектродными лампами, имеющими относительно небольшие внутренние сопротивления, при применяемых на практике сопротивлениях R_a и при рационально выполненном монтаже (емкость монтажных проводов и деталей по отношению к корпусу и между собой невелика) существенное понижение усиления обычно наблюдается только на частотах более высоких, чем высшая частота необходимой полосы пропускания усилителей н. ч. В ступенях же с пентодами, имеющими, как известно, более высокие внутренние сопротивления, завал усиления наблюдается на менее высоких частотах. Например, если в анодную цепь пентода включено сопротивление R_a величиной около 0,1 *мгом*, то обычно имеет место уменьшение усиления на 3 *дб* на частотах 15—20 *кгц*. При бо́льших анодных сопротивлениях завал усиления наступает раньше. Так, при $R_a = 0{,}22 - 0{,}27$ *мгом* усиление уменьшается на 3 *дб* при частотах 8—10 *кгц*, а при $R_a = 0{,}47 - 0{,}56$ *мгом* уже на частотах 4—5 *кгц*. Эти цифры являются ориентировочными, так как емкость монтажа в каждом отдельном случае имеет разную величину, а разные лампы обладают различными внутренними емкостями. Из этих данных можно сделать вывод, что для расширения полосы пропускания ступени усиления н. ч. на сопротивлениях в сторону верх-

Расчетные данные ступеней усиления и. ч. на

R_a, мгом	R_{c2}, мгом	6С5, 6Ж7 (триодное включение) $R_к$, ком	6С5, 6Ж7 U_{mc2}, в	6С5, 6Ж7 K	6С2С, 6Н8С (один триод) $R_к$, ком	6С2С, 6Н8С U_{mc2}, в	6С2С, 6Н8С K	6Н7С (один триод) $R_к$, ком	6Н7С U_{mc2}, в	6Н7С K
Напряжение источника анод										
0,05	0,05	2,8	20	9	1,6	15	11	—	—	—
0,05	0,1	3,4	24	9	2,1	20	12	—	—	—
0,05	0,25	3,8	28	10	2,4	24	13	—	—	—
0,1	0,1	4,8	22	10	3,5	17	13	1,9	18	16
0,1	0,25	6,4	31	11	3,9	24	13	2,2	27	19
0,1	0,5	7,5	32	12	4,4	27	13	2,5	28	20
0,25	0,25	11	25	12	7,9	20	13	4	22	20
0,25	0,5	14	32	12	9,8	25	13	4,9	28	22
0,25	1	17	36	13	11	28	13	5,4	34	23
0,5	0,5	—	—	—	—	—	—	7	25	22
0,5	1	—	—	—	—	—	—	8,5	32	23
0,5	2	—	—	—	—	—	—	9,6	36	23
Напряжение источника анод										
0,05	0,05	2,2	48	10	1,2	34	13	—	—	—
0,05	0,1	2,7	63	11	1,5	42	13	—	—	—
0,05	0,25	3,1	76	11	1,7	51	13	—	—	—
0,1	0,1	3,9	58	12	2,3	36	14	1,3	49	19
0,1	0,25	5,3	76	12	2,8	48	14	1,7	65	21
0,1	0,5	6,2	77	13	3,2	53	14	1,9	70	22
0,25	0,25	9,5	62	13	5,6	39	14	2,9	56	23
0,25	0,5	12	73	13	7	51	14	3,8	70	24
0,25	1	15	83	13	8	56	14	4,3	80	24
0,5	0,5	—	—	—	—	—	—	5,2	62	24
0,5	1	—	—	—	—	—	—	6,6	76	25
0,5	2	—	—	—	—	—	—	7,6	86	25
Напряжение источника анод										
0,05	0,05	2,1	80	11	1	58	13	—	—	—
0,05	0,1	2,6	99	11	1,3	72	14	—	—	—
0,05	0,25	3,1	116	12	1,5	85	14	—	—	—
0,1	0,1	3,8	92	12	1,9	60	14	1,1	85	20
0,1	0,25	5,3	118	13	2,4	79	14	1,5	116	22
0,1	0,5	6	124	13	2,7	90	14	1,7	122	23
0,25	0,25	9,6	103	13	4,6	65	14	2,6	105	23
0,25	0,5	12	120	14	5,8	80	14	3,4	122	24
0,25	1	14	136	14	6,9	90	14	4	140	24
0,5	0,5	—	—	—	—	—	—	4,8	107	2
0,5	1	—	—	—	—	—	—	6,1	132	2
0,5	2	—	—	—	—	—	—	7,1	146	2

ТАБЛИЦА 5

сопротивлениях с трехэлектродными лампами

6Н9С (один триод)			6Г1, 12Г1 (триодная часть)			6Г2, 12Г2 (триодная часть)			6Г7 (триодная часть)			6Ф5		
$R_н$, *ком*	U_{mc2}, *в*	*K*	$R_н$, *ком*	U_{mc2}, *в*	*K*	$R_н$, *ком*	U_{mc2}, *в*	*K*	$R_н$, *ком*	U_{mc2}, *в*	*K*	$R_н$, *ком*	U_{mc2}, *в*	*K*
ного питания U_{a0} = 90 *в*														
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	2,6	25	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	7	23	4,4	5	28
—	—	—	4,4	27	10	6,6	7	29	4,2	11	28	4,8	7	34
—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,3	12	29	5	8	35
—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,2	11	31	8	8	39
—	—	—	9,8	25	11	11	10	40	7,6	15	32	8,8	10	43
—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	18	33	9	14	44
—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	12	31	12	8	43
—	—	—	—	—	—	17	14	44	12	18	33	13	11	46
—	—	—	—	—	—	—	—	—	14	24	37	15	12	48
ного питания U_{a0} = 180 *в*														
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	2,1	50	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,9	24	25	3	50	10	—	—	—	1,6	27	28	1,8	22	37
2,1	34	29	4,1	61	10	2,9	31	36	1,9	36	33	2	32	44
2,4	38	33	4,6	65	10	—	—	—	2,1	41	35	2,2	35	46
3,7	29	35	—	—	—	4,3	30	43	3,4	35	36	3,5	29	48
4,3	39	39	8,8	56	10	4,8	40	50	4	43	38	4,1	36	53
4,8	45	41	—	—	—	5,3	46	53	4,5	52	40	4,5	45	57
6,1	34	40	—	—	—	—	—	—	6	42	39	6,1	34	53
6,8	45	43	—	—	—	8	46	57	7,1	50	40	6,9	46	63
7,8	51	45	—	—	—	—	—	—	7,9	58	41	7,7	52	66
ного питания U_{a0} = 300 *в*														
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	2	87	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,5	49	29	—	—	—	—	—	—	1,2	49	34	1,3	46	42
1,9	70	34	3,8	96	10	2,2	58	39	1,5	73	39	1,6	60	49
2,1	76	36	—	—	—	—	—	—	1,7	75	40	1,7	67	52
2,8	63	39	—	—	—	—	—	—	2,6	61	42	2,6	58	56
3,4	78	42	8,4	87	11	3,9	72	53	3	73	45	3,2	76	63
3,7	90	45	—	—	—	—	—	—	3,6	87	45	3,5	89	67
4,7	70	45	—	—	—	—	—	—	4,6	66	45	4,5	70	65
6	87	48	—	—	—	6,1	88	60	5,5	85	46	5,4	87	70
6,6	100	49	—	—	—	—	—	—	6,2	93	47	6,1	90	70

ТАБЛИЦА 6

Расчетные данные ступеней усиления н. ч. на сопротивлениях с подогревными пентодами

R_a, мгом	R_{c2}, мгом	6Ж7				6Ж8				6Б8С			
		$R_к$, ком	$R_э$, мгом	U_{mc2}, в	K	$R_к$, ком	$R_э$, мгом	U_{mc2}, в	K	$R_к$, ком	$R_э$, мгом	U_{mc2}, в	K
Напряжение источника анодного питания $U_{a0}=90$ в													
0,1	0,1	1,2	0,37	24	41	—	—	—	—	2	0,37	26	24
0,1	0,25	1,1	0,44	31	55	0,9	0,29	32	68	2,2	0,5	39	33
0,1	0,5	1,3	0,44	46	66	—	—	—	—	2	0,6	41	37
0,25	0,25	2,4	1,1	32	70	—	—	—	—	3,5	1,18	36	43
0,25	0,5	2,6	1,18	45	85	1,7	0,92	25	93	3,5	1,1	46	55
0,25	1,0	3,6	1,4	46	92	—	—	—	—	3,5	1,35	45	65
0,5	0,5	4,7	2,18	39	93	—	—	—	—	5	2,6	31	63
0,5	1,0	5,5	2,6	41	120	3,8	1,7	31	119	6	2,8	41	85
0,5	2,0	5,5	2,7	38	140	—	—	—	—	6,2	2,9	38	100
Напряжение источника анодного питания $U_{a0}=180$ в													
0,1	0,1	1	0,44	59	51	—	—	—	—	1	0,44	42	30
0,1	0,25	0,7	0,5	73	69	0,8	0,31	84	82	1,2	0,5	73	41
0,1	0,5	0,8	0,5	83	83	—	—	—	—	1,2	0,6	74	46

0,25	0,25	1,2	1,1	57	93	1,1	0,83	53	109	1,9	1,18	55	55
0,25	0,5	1,6	1,18	84	118	1,1	0,94	66	131	2,1	1,2	77	69
0,25	1,0	2	1,4	84	140	1,1	0,94	76	161	2,2	1,5	74	83
0,5	0,5	2,6	2,45	63	135	—	—	—	—	3,3	2,6	66	81
0,5	1,0	3,1	2,9	79	165	2,2	2,2	62	192	3,5	2,8	77	115
0,5	2,0	3,5	2,7	84	165	—	—	—	—	3,5	3,0	74	116

Напряжение источника анодного питания $U_{a0} = 300$ *в*

0,1	0,1	0,5	0,44	77	61	—	—	—	—	0,9	0,5	84	36
0,1	0,25	0,4	0,50	114	82	0,5	0,37	135	98	1,1	0,55	125	47
0,1	0,5	0,6	0,53	135	94	—	—	—	—	0,9	0,6	130	54
0,25	0,25	1,1	1,18	114	104	—	—	—	—	1,5	1,2	100	64
0,25	0,5	1,2	1,18	146	140	0,9	1,1	124	167	1,6	1,2	140	79
0,25	1,0	1,3	1,45	155	185	—	—	—	—	1,8	1,5	134	100
0,5	0,5	1,7	2,45	105	161	—	—	—	—	2,4	2,7	112	96
0,5	1,0	2,2	2,9	137	350	1,4	2,2	112	238	2,5	2,9	170	150
0,5	2,0	2,3	2,95	140	240	—	—	—	—	2,8	3,4	127	145

них частот нужно уменьшать величину ее анодного сопротивления R_a. Но в то же время нужно учитывать, что уменьшение величины R_a ведет к уменьшению усиления, даваемого ступенью.

Расчет ступени усиления на сопротивлениях. По табл. 5 и 6 можно определить коэффициенты усиления K ступеней на сопротивлениях с подогревными трехэлектродными лампами (фиг. 15,*в*) и пентодами (фиг. 15,*г*) при напряжениях источников анодного питания в 90, 180 и 300 *в* и при различных величинах анодных сопротивлений R_a и сопротивлений R_{c2} в цепи управляющей сетки лампы $Л_2$ следующей ступени.

В табл. 5 и 6 указано также, какой величины нужно включать в схемы сопротивления автоматического смещения $R_к$, а для пентодов даны и величины понижающих сопротивлений $R_э$ в цепях их экранных сеток, при которых достигаются указанные коэффициенты усиления K. Для двойных триодов 6Н8С и 6Н9С указаны величины сопротивлений $R_к$, включаемые в цепь каждого из катодов. При параллельном соединении катодов, когда смещение на сетки обоих триодов 6Н8С или 6Н9С подается от общего сопротивления, указанную в табл. 5 величину $R_к$ нужно уменьшить вдвое. В графах U_{mc2} приведены наибольшие напряжения н. ч. на сопротивлении R_{c2}, при которых с нелинейными искажениями можно практически не считаться.

Во всех случаях сопротивление $R_к$ должно быть шунтировано конденсатором $C_к$ (см. фиг. 15) емкостью не менее 10 *мкф*.

Чтобы на низшей частоте полосы пропускания усиление ступени не уменьшалось по сравнению с усилением на средних частотах более чем на 2 *дб* при работе с триодом или более чем на 3 *дб* при работе с пентодом, конденсатор C (см. фиг. 15) должен иметь емкость не меньше указанной в табл. 7.

Выбор емкости конденсатора $C_э$, блокирующего экранную сетку пентода, производится по табл. 8.

Если после ступени предварительного усиления следует оконечная ступень с лампой 6П6С или 6Ф6С, то сопротивления R_a и R_{c2} должны быть не более чем по 0,1 *мгом* при фиксированном смещении на сетке оконечной ступени и не более чем по 0,25 *мгом* при автоматическом смещении.

ТАБЛИЦА 7

Минимальная емкость переходного конденсатора $C_п$ в схеме ступени усиления на сопротивлениях

R_{c2}, *мгом*	$C_п$ при низшей частоте полосы пропускания			
	70 *гц*	100 *гц*	150 *гц*	200 *гц*
0,047—0,05	0,1 *мкф*	0,07 *мкф*	0,06 *мкф*	0,04 *мкф*
0,1	0,07 *мкф*	0,04 *мкф*	0,03 *мкф*	0,02 *мкф*
0,25—0,27	0,025 *мкф*	0,015 *мкф*	10 000 *пф*	7 500 *пф*
0,47—0,5	15 000 *пф*	10 000 *пф*	6 800 *пф*	5 100 *пф*
1,0	6 200 *пф*	4 300 *пф*	2 700 *пф*	2 000 *пф*
2,0—2,2	3 000 *пф*	2 000 *пф*	1 500 *пф*	1 000 *пф*
3,3	2 000 *пф*	1 500 *пф*	1 000 *пф*	1 000 *пф*

Примечание. Конденсаторы, емкости которых указаны в пикофарадах,— типа КСО, а емкости которых указаны в микрофарадах, — типа КБГ.

ТАБЛИЦА 8

Емкость конденсатора $C_э$ шунтирующего экранирующую сетку пентода ступени усиления на сопротивлениях

$R_э$, *мгом*	$C_э$, *мкф*, при низшей частоте полосы пропускания			
	70 *гц*	100 *гц*	150 *гц*	200 *гц*
0,27—0,5	0,15	0,1	0,07	0,05
0,55—1,5	0,1	0,07	0,05	0,04
1,6—3,0	0,07	0,05	0,04	0,025
3,1—5,0	0,04	0,025	0,025	0,015

Примечание. Во всех случаях можно применять конденсаторы типа КБГ или МКВ.

При работе в оконечной ступени лампы 6П3С с фиксированным смещением, сопротивления R_a и R_{c2} должны быть не больше, чем по 0,1 *мгом*, и при автоматическом смещении не более, чем по 0,15 *мгом*. Когда же в оконечной ступени применяется лампа 6П9, допустимо иметь R_{c2} до 0,25 *мгом* при фиксированном смещении и до 1 *мгом* при автоматическом смещении.

По табл. 9 можно выбирать величины сопротивлений R_a, R_{c2} и определить усиление K ступени усиления н. ч., в которой используется пентодная часть батарейной пальчиковой лампы типа 1Б1П (фиг. 15,*б*). Выбор емкостей $C_п$ и $C_э$ и для ступени с этой лампой производится по табл. 7 и 8.

ТАБЛИЦА 9

Расчетные данные ступени усиления н. ч. на сопротивлениях, в которой используется пентодная часть пальчиковой лампы прямого накала 1Б1П

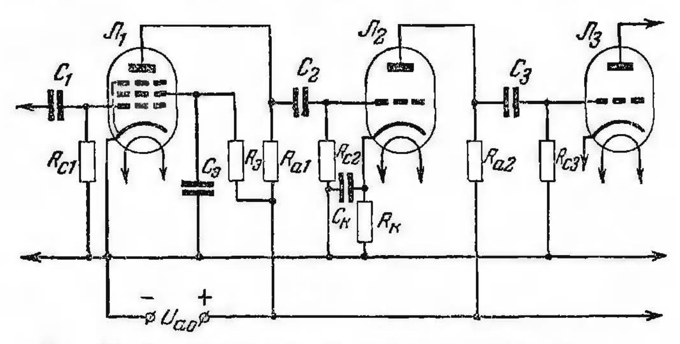
R_a, *мгом*	R_{c2}, *мгом*	$R_в$, *мгом*	U_{mi2}, *в*	*K*
Напряжение источника анодного питания $U_{a0}=45$ *в*				
0,22	0,22	0,27	20	17
0,22	0,47	0,36	24	24
0,22	1,0	0,4	25	28
0,47	0,47	0,82	20	25
0,47	1,0	1,0	24	33
0,47	2,2	1,1	25	38
1	1,0	1,9	20	31
1	2,2	2,0	24	38
1	3,3	2,2	25	43
Напряжение источника анодного питания $U_{a0}=90$ *в*				
0,22	0,22	0,5	43	25
0,22	0,47	0,59	52	34
0,22	1,0	0,67	56	41
0,47	0,47	1,2	43	37
0,47	1,0	1,4	50	47
0,47	2,2	1,6	56	57
1	1,0	2,5	43	45
1	2,2	2,9	50	58
1	3,3	3,1	53	66
Напряжение источника анодного питания $U_{a0}=135$ *в*				
0,22	0,22	0,66	63	31
0,22	0,47	0,71	79	41
0,22	1,0	0,86	84	54
0,47	0,47	1,45	65	44
0,47	1,0	1,8	76	62
0,47	2,2	1,9	84	71
1	1,0	3,1	63	56
1	2,2	3,7	75	76
1	3,3	4,3	79	88

Когда лампа 1Б1П работает при небольших амплитудах переменного напряжения в цепи управляющей сетки, достаточное смещение, обеспечивающее усиление практически без нелинейных искажений, можно получить от действия

напряжения сигнала, поступающего на управляющую сетку лампы. В создании этого смещения участвуют конденсатор $C_{вх}$ и сопротивление R_{c1}, работающие в этом случае как конденсатор и сопротивление цепи сетки сеточного детектора радиоприемника. Сопротивление R_{c1} при этом должно иметь величину 3 — 10 *мгом*, а $C_{вх} = 0{,}05 \div 0{,}1$ *мкф*.

Такой же способ получения смещения иногда применяется и в схемах с подогревными лампами (фиг. 15,*е*).

Многоступенный усилитель. Если необходимо иметь большее усиление напряжения, чем может дать одна ступень предварительного усиления, применяют многоступенные усилители на сопротивлениях.



Фиг. 17. Трехступенный усилитель на сопротивлениях.

В таких случаях подлежащее усиление напряжения н. ч. поступает в цепь управляющей сетки лампы первой ступени, усиленное ею напряжение передается способом, указанным выше, в цепь сетки второй ступени и т. д. Наконец, с последней ступени предварительного усиления напряжение н. ч. подается в цепь управляющей сетки оконечной ступени. На фиг. 17 показана схема, содержащая две ступени предварительного усиления (с лампами $Л_1$ и $Л_2$) и оконечную ступень (с лампой $Л_3$).

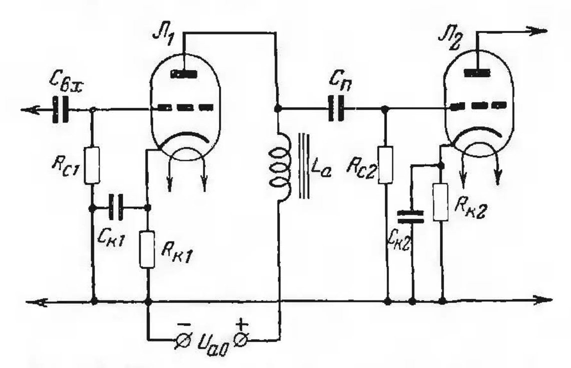
Расчет многоступенного усилителя может производиться с помощью табл. 5, 6, 7, 8 и 9, по которым рассчитывается отдельно каждая ступень. Общее усиление нескольких ступеней предварительного усиления будет равно произведению усилений отдельных ступеней. Падение усиления в многоступенном усилителе при низшей частоте полосы пропускания можно найти, умножая падение усиления для одной ступени на число ступеней. Так, если уменьшение усиления на частоте 100 *гц* для одной ступени с триодом составляет

2 *дб*, то падение усиления для двух ступеней составит 4 *дб*, для трех ступеней 6 *дб* и т. д. При необходимости уменьшить эти «завалы» следует увеличить емкости переходных конденсаторов.

Сопротивления в цепях сеток многоступенного усилителя рекомендуется применять величиной не более чем на 0,25 *мгом*.

8. СТУПЕНЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ С ДРОССЕЛЕМ

Схема ступени усиления с дросселем отличается от схемы на сопротивлениях тем, что в анодную цепь ее лампы вместо сопротивления включается обладающая большой индуктивностью дроссельная катушка с сердечником из стальных пластин (фиг. 18).



Фиг. 18. Схема ступени усиления с дросселем.

Действие схемы. Схема с дросселем работает примерно так же, как и схема на сопротивлениях: от изменения напряжения на управляющей сетке лампы $Л_1$ изменяется ее анодный ток, что в свою очередь ведет к изменениям напряжения на дросселе и на управляющей сетке следующей лампы $Л_2$, присоединенной к анодному концу дросселя через конденсатор $C_п$. Так как дроссель обладает сравнительно небольшим активным сопротивлением, напряжение на аноде лампы $Л_1$ почти равно анодному напряжению источника питания. Поэтому при том же источнике анодного напряжения можно получить в области отрицательных напряжений на сетке больший прямолинейный участок динамической характеристики, чем в случае высокоомного сопротив-

ления в анодной цепи, а следовательно, можно подводить к сетке лампы большие амплитуды переменного напряжения и получать большие амплитуды напряжения в анодной цепи.

Частотная характеристика. Для переменных токов, проходящих в анодной цепи, дроссель представляет главным образом индуктивное сопротивление, которое, как известно, возрастает с частотой. Поэтому при одинаковых амплитудах на сетке, но при разных частотах, на дросселе получатся разные амплитуды переменного напряжения: более высокие частоты будут усиливаться лучше, чем более низкие. Для уменьшения частотных искажений нужно делать дроссель с большей индуктивностью, т. е. увеличивать сечение его сердечника и число витков. Однако с повышением числа витков обмотки дросселя увеличивается и ее распределенная емкость. Эта емкость, включенная как бы параллельно дросселю, уменьшает его действующее сопротивление, что особенно сказывается на верхних частотах, в результате чего напряжение на этих частотах уменьшается и усиление спадает. Для уменьшения емкости обмотка дросселя делается секционированной.

Индуктивность дросселя совместно с его распределенной емкостью и другими подключенными параллельно емкостями образует резонансный контур, который может оказаться настроенным на частоты, находящиеся в пределах полосы пропускания. На этих частотах и частотах, близких к ним, благодаря резонансу усиление возрастает. Все это ведет к ухудшению частотной характеристики ступени с дросселем. Чтобы выравнять частотную характеристику ступени, дроссель можно зашунтировать сопротивлением.

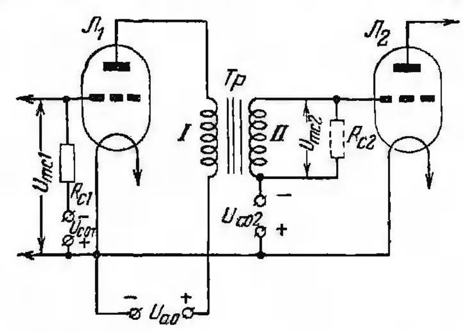
Иногда усилители н. ч. строят с несколькими ступенями на дросселях. Следует, однако, отметить, что схемы с дросселями в радиолюбительской практике применяются редко.

9. СТУПЕНИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ С ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Рассмотренные выше ступени на сопротивлениях и на дросселях всегда дают меньшее усиление, чем коэффициент усиления лампы, работающей в данной ступени. Схема усилителя н. ч., в которой для подачи напряжения с анода предыдущей на сетку последующей лампы применен повышающий трансформатор (фиг. 19), в этом отношении более выгодна. Одна ступень усиления с трансформатором может

дать усиление, по величине превосходящее коэффициент усиления лампы.

Работает она следующим образом. Переменное напряжение, приложенное к управляющей сетке лампы $Л_1$, заставляет пульсировать ее анодный ток, который проходит через первичную обмотку *I* трансформатора *Тр*. Изменяясь по величине, анодный ток изменяет намагничивание сердечника трансформатора, что в свою очередь создает напряжение на его вторичной обмотке, которая включена в цепь управляющей сетки следующей лампы $Л_2$ усилителя. Чем больше отношение витков вторичной обмотки трансформатора к



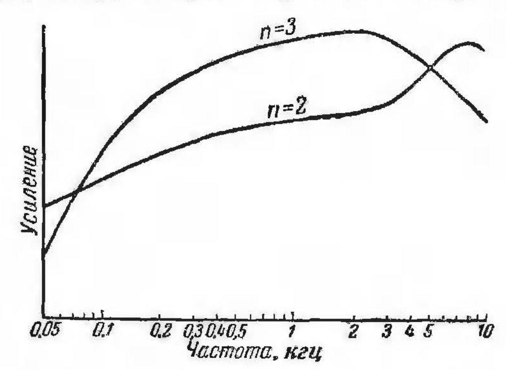
Фиг. 19. Схема ступени усиления с трансформатором.

виткам его первичной обмотки, тем больше напряжение на вторичной обмотке, а значит и на управляющей сетке лампы $Л_2$.

Частотные характеристики. Для нижних частот индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора относительно невелико и на этой обмотке получается относительно небольшое переменное напряжение н. ч. С увеличением частоты напряжение на первичной и вторичной обмотках растет, но в то же время увеличивается падение напряжения на индуктивности рассеяния. Далее начинает сказываться распределенная емкость вторичной обмотки. Эта емкость как бы включена параллельно вторичной обмотке (шунтирует ее), в результате чего напряжение на ней уменьшается. Здесь как бы борются, с одной стороны, увеличение напряжения от роста с частотой индуктивного сопротивления, а с другой стороны, уменьшение напряжения вследствие усиления влияния индуктивности рассеяния и собственной емкости. При дальнейшем увели-

чении частоты влияние индуктивности рассеяния и собственной емкости преобладает и напряжение на вторичной обмотке трансформатора начинает падать. На некоторых участках характеристики могут иметь довольно резко выраженную форму горбов (фиг. 20). Это явление вызывается резонансом. Индуктивность рассеяния вторичной обмотки вместе с междувитковой емкостью, емкостью присоединенного к ней монтажа и междуэлектродными емкостями лампы образует колебательный контур, настроенный на некоторую частоту звукового диапазона.

Если в цепь сетки лампы, в анодную цепь которой включен трансформатор, поступит переменное напряжение часто-



Фиг. 20. Частотные характеристики ступеней усиления с трансформаторами, имеющими различные отношения чисел витков.

ты, соответствующей резонансной частоте трансформатора или близкой к ней, то на этой частоте будет наблюдаться некоторое увеличение напряжения на вторичной обмотке трансформатора, обусловленное явлением резонанса, т. е. увеличение усиления этой частоты по сравнению с другими частотами. В трансформаторах, имеющих разные сердечники, разные числа витков обмоток, резонансы получаются при различных частотах. У трансформаторов с большим отношением чисел витков n приходится наматывать большое число витков вторичной обмотки, чтобы не делать первичные обмотки с малым числом витков, так как это вредно отразилось бы на усилении нижних частот. Вследствие этого вторичная обмотка имеет бóльшую собственную емкость и она сильнее влияет на равномерность усиления.

В результате трансформатор с бо́льшим отношением чисел витков, хотя и дает на средних частотах большее усиление, но частотная характеристика усилителя с таким трансформатором получается хуже, чем у трансформатора с меньшим отношением чисел витков (см. фиг. 20).

Включение шунта. Параллельно вторичной обмотке трансформатора часто включают сопротивление R_{c2} порядка десятков или сотен тысяч ом (на фиг. 19 оно показано пунктиром). Нагружая трансформатор и тем самым, внося затухание в контур, состоящий из индуктивностей и емкостей трансформатора, такой шунт делает резонансный пик на частотной характеристике более тупым и, следовательно, выравнивает усиление различных частот. С той же целью иногда на трансформатор наматывают кроме основных обмоток еще третью короткозамкнутую обмотку, состоящую из нескольких витков, которая создает постоянную нагрузку.

Применяя эти способы улучшения частотной характеристики, надо иметь в виду, что нагрузка на трансформатор уменьшает на всех частотах усиление, даваемое ступенью.

Лампы для ступеней с трансформаторами. Для получения возможно более равномерного усиления различных частот в трансформаторной ступени желательно применять лампу с возможно меньшим внутренним сопротивлением. С той же индуктивностью первичной обмотки трансформатора такая лампа при нижних частотах обеспечивает получение большего напряжения на первичной обмотке, чем лампа с большим внутренним сопротивлением. С другой стороны, при лампе с меньшим внутренним сопротивлением можно сделать первичную обмотку трансформатора с меньшим числом витков (так как допустима меньшая ее индуктивность) и тем самым снизить собственную распределенную емкость обмоток и улучшить усиление верхних частот.

Наиболее пригодными по этим соображениям являются триоды 6С5, 6С2С и двойные триоды 6Н7С, 6Н8С.

Триоды, обладающие большим внутренним сопротивлением, например 6Ф5 и 6Н9С, а также пентоды 6Ж7, 6Ж8 и др., по этим причинам в трансформаторных ступенях предварительного усиления не применяются, хотя и обладают большими коэффициентами усиления.

Расчет усилении ступени. Усиление ступени с трансформатором, вторичная обмотка которого шунтирована сопро-

тивлением R_{c2}, может быть определено приближенно для средних частот по следующей формуле:

$$K = \mu n \frac{R_{c2}}{n^2 (R_i + R_1) + R_{c2}}, \qquad (21)$$

где K — усиление ступени, т. е. число, показывающее, во сколько раз напряжение н. ч. на вторичной обмотке трансформатора больше напряжения н. ч., действующего в цепи сетки лампы ступени;

μ — коэффициент усиления лампы;

R_i — ее внутреннее сопротивление;

R_1 — активное сопротивление первичной обмотки трансформатора;

R_{c2} — сопротивление, включенное параллельно вторичной обмотке трансформатора;

n — коэффициент трансформации трансформатора.

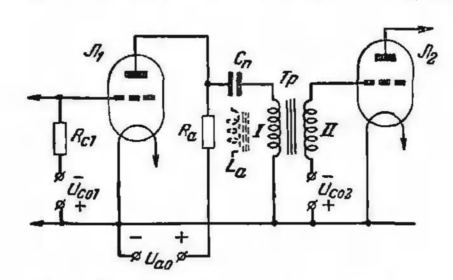
Минимально необходимая индуктивность L_1 в генри первичной обмотки трансформатора для заданной низшей частоты полосы пропускания может быть определена по следующей приближенной формуле:

$$L_1 = L_0 \frac{R_{c2}(R_i + R_1)}{n^2 (R_i + R_1) + R_{c2}}. \qquad (22)$$

Вспомогательный коэффициент L_0 находим по графику фиг. 13 по заданным низшей частоте пропускания и допустимому уменьшению усиления на этой частоте в децибелах. Обычно принимают уменьшение усиления не более $1 \div 2$ *дб* по сравнению с усилением на средних частотах.

Трансформаторная схема с параллельным питанием. На фиг. 21 приведен вариант трансформаторной схемы усиления, так называемая схема с параллельным питанием. Здесь в анодную цепь лампы $Л_1$ между положительным полюсом источника анодного напряжения и анодом лампы включено активное сопротивление R_a порядка нескольких десятков тысяч ом или дроссель L_a с сердечником и с большим числом витков. Постоянный анодный ток проходит через это сопротивление R_a (или дроссель L_a). Когда на управляющую сетку лампы поступает переменное напряжение, то на сопротивлении (дросселе) получается переменное напряжение с большей амплитудой за счет усилительного действия лампы $Л_1$. Это переменное напряжение через кон-

денсатор C_n и через источники питания попадает на первичную обмотку I трансформатора Tp и на вторичной II его обмотке получается переменное напряжение большей амплитуды. Конденсатор C_n должен обеспечить прохождение через него самых низких частот без заметных потерь. Для этого он



Фиг. 21. Трансформаторная схема с параллельным питанием.

должен иметь емкость порядка десятков или сотен тысяч пикофарад. Индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора должно быть больше сопротивления R_a или индуктивного сопротивления дросселя L_a.

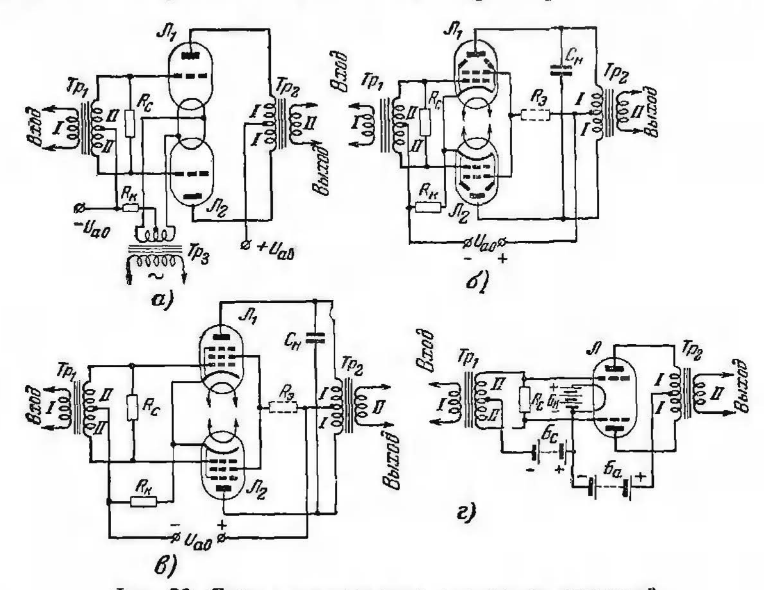
10. ДВУХТАКТНЫЕ СТУПЕНИ

Двухтактные схемы применяются главным образом в оконечных, а также в предоконечных ступенях усилителей н. ч. В двухтактной ступени должны работать обязательно две или большее четное число ламп, либо двойной триод. На фиг. 22 показаны наиболее распространенные схемы двухтактных ступеней. Каждая такая схема содержит два трансформатора: входной трансформатор* ступени Tp_1 и выходной Tp_2. Конденсатор $C_н$ является корректирующим. Он выполняет такую же роль, как и в одноламповой ступени.

На первичную обмотку трансформатора Tp_1 подается переменное напряжение н. ч. с предварительного усилителя. Если предоконечная ступень работает с одной лампой, один конец первичной обмотки этого трансформатора соединяется с положительным полюсом анодной батареи или выпрями-

* Входной трансформатор отсутствует, если предыдущая ступень выполнена по так называемой фазопереворачивающей (фазоинверсной) схеме, о которой будет рассказано ниже.

теля, а другой конец — с анодом лампы этой ступени. К одному концу вторичной обмотки *II* трансформатора $Тр_1$ присоединяется управляющая сетка одной лампы двухтактной ступени, а к другому — управляющая сетка второй ее лампы. Когда применяется автоматическое смещение, средняя точка вторичной обмотки входного трансформатора $Тр_1$ соединяется с катодами ламп двухтактной ступени через сопротивление смещения $R_к$ и к ней же подводится минус анодного напряжения. В схемах с фиксированным смеще-



Фиг. 22. Схемы двухтактных оконечных ступеней.

а — ступень на трехэлектродных лампах прямого накала с питанием нитей накала ламп от понижающей обмотки силового трансформатора $Тр_3$; *б* — ступень на подогревных тетродах (сопротивление $R_э$ применяется только в тех случаях, когда на экранные сетки нужно подать меньшее напряжение, чем на аноды ламп); *в* — ступень на подогревных пентодах; *г* — ступень на двойном триоде.

нием к средней точке вторичной обмотки этого трансформатора присоединяется отрицательный полюс источника напряжения смещения; в этом случае положительный полюс этого источника и отрицательный полюс источника анодного напряжения соединяются непосредственно с катодами ламп. Аноды ламп двухтактной ступени присоединяются к концам первичной обмотки *I* выходного трансформатора $Тр_2$, а к средней точке этой обмотки подводится положительный полюс анодного напряжения (от батареи или выпрямителя).

Одна электронная лампа (или несколько соединенных параллельно электронных ламп) или половина двойного триода вместе с одной половиной вторичной обмотки входного трансформатора и одной половиной первичной обмотки выходного трансформатора носит название *плеча* двухтактной ступени.

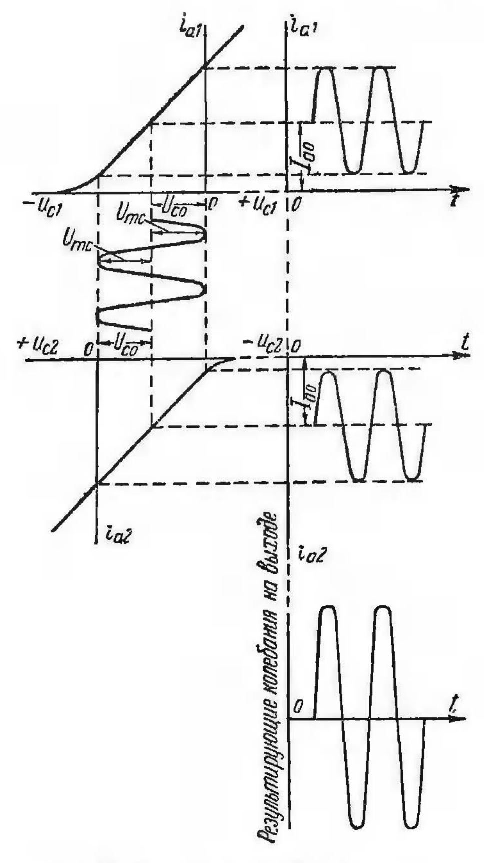
К концам вторичной обмотки выходного трансформатора, как и в обычном усилителе, присоединяется нагрузка (звуковая катушка электродинамического громкоговорителя, линии радиотрансляционной сети и т. п.).

Принцип работы схемы. Так как управляющие сетки ламп двухтактной ступени соединены с противоположными концами вторичной обмотки входного трансформатора, при увеличении напряжения на управляющей сетке одной лампы напряжение на управляющей сетке другой лампы уменьшается и наоборот (при условии, если амплитуды напряжения на сетках не превышают величины постоянного отрицательного смещения). В соответствии с изменениями напряжений на сетках ламп изменяются и их анодные токи (фиг. 23). В то время как анодный ток i_{a1} одного плеча возрастает, анодный ток i_{a2} другого плеча уменьшается. Во время следующего полупериода имеет место обратное явление (при таких соотношениях в изменениях переменных напряжений и токов говорят, что они противоположны по фазе).

Так как эти токи проходят по двум половинам первичной обмотки выходного трансформатора в разные стороны, увеличение анодного тока первого плеча и одновременное уменьшение анодного тока второго плеча создают во вторичной обмотке трансформатора э. д. с. и ток одного и того же направления. Соответственно, когда анодный ток первого плеча будет уменьшаться, а анодный ток второго плеча увеличиваться, э. д. с. и ток вторичной обмотки переменят свое направление. Другими словами, выходной трансформатор будет как бы складывать действие анодных токов обеих ламп.

В то же время постоянное магнитное поле, создаваемое постоянной составляющей анодного тока одного плеча, будет противоположно постоянному магнитному полю, создаваемому постоянной составляющей тока другого плеча. При равенстве этих постоянных составляющих сердечник не получает постоянного подмагничивания (вследствие производственной неоднородности ламп постоянные составляющие их анодных токов всегда несколько отличаются друг от друга и некоторое слабое постоянное подмагничивание все

же имеет место). Поэтому опасность насыщения сердечника выходного трансформатора силовыми линиями постоянного магнитного поля отсутствует, даже когда его сердечник имеет меньший объем, чем в обычной оконечной ступени та-



Фиг. 23. Работа двухтактной ступени в режиме класса А.

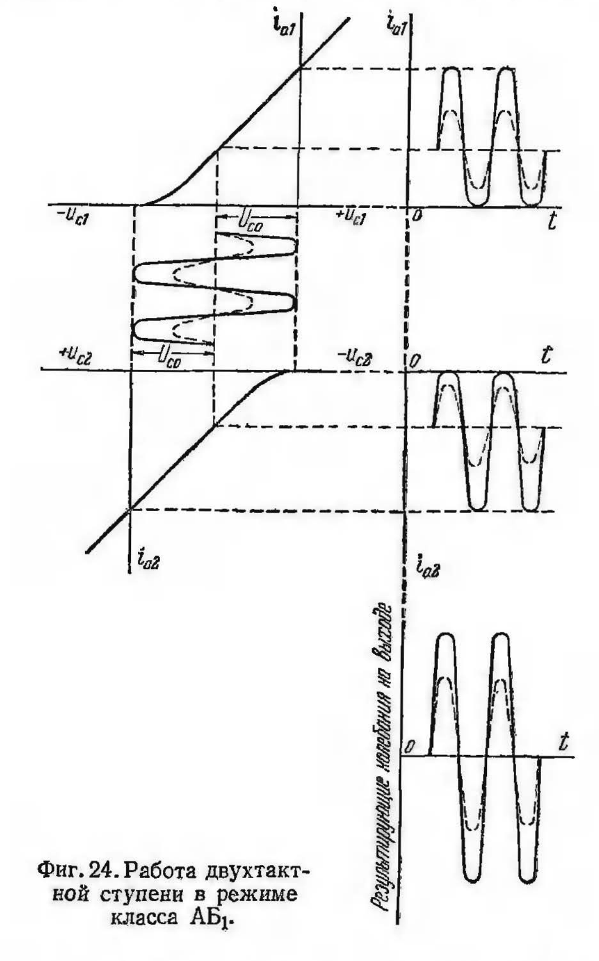
кой же мощности, и не имеет воздушного зазора. Вследствие этого выходные трансформаторы двухтактных ступеней делаются меньших габаритов и без зазоров.

Режимы работы. Ранее упоминалось, что в схеме усилительной ступени с одной лампой анодный ток покоя всегда должен быть больше амплитуды его переменной составляю-

щей, так как иначе в усиленном сигнале возникают значительные нелинейные искажения. Вследствие этого обычная схема потребляет от источника анодного питания относительно большой ток, величина которого не зависит от того, подводится к управляющей сетке лампы переменное напряжение н. ч. или оно отсутствует. В таком же режиме, который носит название *режима класса А*, могут работать и лампы двухтактной схемы (фиг. 23).

Однако двухтактная схема может работать в более экономичном режиме. Для этого на управляющие сетки ее ламп нужно подать такое отрицательное напряжение, при котором рабочие точки переместятся к нижним сгибам характеристик (фиг. 24). При относительно малых амплитудах напряжения на управляющих сетках лампы, стоящие в таком режиме, будут также работать в режиме класса А, причем нелинейные искажения будут меньше, чем в однотактной схеме (изменения их анодных токов при таких амплитудах показаны на фиг. 24 пунктиром). По мере увеличения амплитуд переменного напряжения в цепях сеток (на вторичной обмотке входного трансформатора) формы кривых анодного тока отдельных плеч все больше и больше будут искажаться: при положительных амплитудах на сетках анодные токи будут возрастать на бóльшую величину, чем величина уменьшения токов при отрицательных амплитудах на сетках. Но в двухтактной ступени нужно учитывать следующее. Во время того полупериода, когда анодный ток первого плеча увеличивается на относительно бóльшую величину, анодный ток второго плеча уменьшается на относительно меньшую величину. Во время же следующего полупериода имеет место обратное явление: анодный ток первого плеча уменьшается на относительно малую величину, а анодный ток второго плеча возрастает на относительно большую величину. В результате совместного действия изменений анодных токов двух плеч создаваемые ими магнитные потоки в сердечнике трансформатора будут изменяться во время обоих полупериодов одинаково. Вследствие этого кривые э. д. с. и тока, индуктированные во вторичной обмотке трансформатора (см. нижнюю часть фиг. 24), будут менее отличаться от кривой напряжения в цепи сетки, чем кривые, по которым изменяются анодные токи отдельных плеч двухтактной ступени. Поэтому нелинейные искажения, создаваемые двухтактной ступенью, будут значительно меньше искажений ступени с одной лампой, работающей в таком же режиме.

При таком режиме работы ламп, называемом *режимом класса АВ*, постоянные составляющие анодных токов зависят от амплитуды переменного напряжения, действующего на управляющих сетках. Чем больше амплитуда переменного



Фиг. 24. Работа двухтактной ступени в режиме класса $АБ_1$.

напряжения, тем больших величин достигают постоянные составляющие. Вследствие этого расход анодного тока на двухтактную ступень, поставленную в такой режим, зависит от величины подводимого сигнала, а среднее значение анодного тока каждой лампы получается существенно меньше, чем на ступень с одной лампой. С другой стороны, от

двух ламп двухтактной ступени, работающих в режиме класса АВ, можно получить превышающую в два с лишним раза мощность, чем от одной такой же лампы, работающей в обычной схеме с тем же анодным напряжением.

Различают два режима класса АВ. При одном из них амплитуды переменного напряжения на сетках двухтактной ступени никогда не превышают величины постоянного смещения (фиг. 24), т. е. ступень работает без токов в цепи управляющей сетки. Такой режим называется *режимом класса* AB_1.

Однако двухтактная оконечная ступень может работать, не создавая больших искажений и при амплитудах на сетках, превышающих постоянное напряжение смещения. При этом искажения, создаваемые неравномерностью в изменениях анодных токов отдельных плеч, вызванной появлением токов в цепях управляющих сеток, также частично компенсируются в выходном трансформаторе. Последний режим носит название *режима класса* AB_2 (фиг. 25) *.

Появление токов сеток ламп оконечной ступени говорит о том, что в цепи управляющих сеток затрачивается некоторая мощность колебаний н. ч. Вследствие этого предоконечная ступень такого усилителя должна работать не только как усилитель напряжения, но и отдавать относительно большую мощность (порядка 5—10% мощности оконечной ступени).

Двойные триоды 6Н7С, предназначенные для работы в оконечных двухтактных ступенях, имеют анодно-сеточные характеристики, расположенные при нормальных рабочих напряжениях почти полностью в области положительных напряжений на сетке. Поэтому оконечные ступени с такими лампами всегда работают в режиме класса AB_2, причем в некоторых случаях на их управляющие сетки вообще не подается отрицательное смещение.

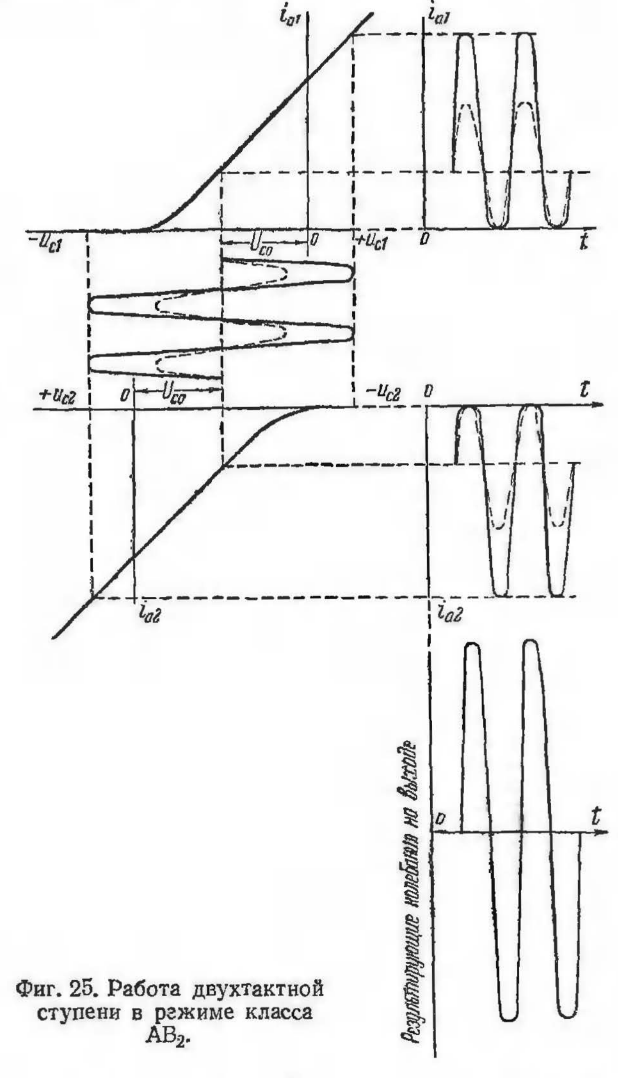
Типовые рабочие режимы двухтактных ступеней с лампами отечественного производства даны в табл. 10.

Другие преимущества двухтактной схемы. При питании усилителей, выполненных по двухтактной схеме от сети пе-

---

* Кроме того, в двухтактных схемах с триодами прямого накала возможен так называемый *режим класса В*. Здесь рабочая точка устанавливается в самом низу сгиба характеристики. При этом анодный ток покоя равен нулю (или очень близок к нулевому значению) и лампы плеч ступени от действия переменного напряжения на сетке работают поочередно. В радиолюбительской практике режим класса *В* почти не находит применения.

ременного тока (накал от понижающей обмотки силового трансформатора, анодные цепи и цепи экранных сеток через выпрямитель), получается меньший фон на выходе



Фиг. 25. Работа двухтактной ступени в режиме класса AB_2.

усилителя, чем при обычной схеме с одной лампой. Объясняется это следующими причинами. Когда вследствие пульсации напряжения сеточного смещения увеличивается или

Типовые режимы двухтакт

Обозначение лампы	Тип лампы, число их в ступени и режим работы	Напряжение накала $U_н$	Ток накала $I_н$	Напряжение источника анодного питания U_{a0}	Напряжение на экранной сетке $U_{э0}$
		в	*а*	*в*	*в*
1Н3С	Двойной триод прямого накала в режиме АВ₂	1,2	0,12	120	—
СО-243	Двойной триод двойного накала в режиме АВ₂	2,0	0,24	120	—
2П1П	Пентод прямого накала при триодном включении, две лампы в режиме АВ₂	1,2	0,24	100	—
4П1Л	Пентод прямого накала, две лампы в режиме АВ₁	2,1	1,3	240	160
	То же, в режиме АВ₂			240	160
	То же, при триодном включении в режиме АВ₁			240	—
	То же, в режиме АВ₂			240	—
6Н7С	Двойной триод подогревный, в режиме АВ₂	6,3	0,8	250	—
				300	—
6Ф6С	Пентод подогревный, две лампы в режиме А	6,3	1,4	250	250
				315	315
	То же, в режиме АВ₂			315	285
				375	250
				375	250
	То же, при триодном включении			350	—
				350	—
6П6С	Лучевой тетрод подогревный, две лампы в режиме АВ₁	6,3	0,9	250	250
				285	285
				300	300

ных оконечных ступеней

Смещение на управляющей сетке U_{c0}, *в*	Амплитуда напряжения между управляющими сетками U_{mcc}, *в*	Сопротивление смещения в цепи катодов $R_к$, *ом*	Анодный ток покоя I_{a0}, *ма*	Анодный ток при максимальной мощности $I_{a\ макс}$, *ма*	Ток покоя экранной сетки $I_{э0}$, *ма*	Ток экранной сетки при максимальной мощности $I_{э\ макс}$, *ма*	Оптимальное нагрузочное сопротивление между анодами R_{aa}, *ком*	Максимальная отдаваемая мощность $P_{макс}$, *вт*	Коэффициент нелинейности γ, %	Примечания (см. на след. стр.)
8,5—9	24	—	5	23	—	—	—	1	10	1
0	—	—	3,2	—	—	—	3	0,8	7	
0	60	—	0,04	29	—	—	4,8	1,4	10	3; 4; 5
—13,2	26,4	—	30	—	4	—	10	6,2	—	1
—13,2	42	—	30	—	4	—	8	9,0	—	1; 8
—26	52	—	30	—	—	—	10	4,3	—	1
—26	78	—	30	—	—	—	9	10,0	—	1; 4; 9
0	82	—	35	70	—	—	8	8	10	4; 6
0	—	—	40	—	—	—	10	10	10	4; 6
16,5	33	205	68	—	13	—	28	6	2	2
22,0	44	220	84	—	16	—	28	10	2	2
—	58	320	73	—	18	—	10	10,5	3	2
—	94	340	54	—	8	—	10	19	5	2
26,0	82	—	34	—	5	—	10	19	5	1
—	132	750	50	—	—	—	10	14	7	2
38	123	—	45	—	—	—	6	18	7	1
15	30	—	70	79	5	12	10	8,5	5	1
19	38	—	70	92	4	14	8	12	4	1
20	40	—	78	90	5	14	8	14	4	1

Обозначение лампы	Тип лампы, число их в ступени и режим работы	Напряжение накала $U_н$	Ток накала $I_н$	Напряжение источника анодного питания U_{a0}	Напряжение на экранной сетке $U_{э0}$
		в	*а*	*в*	*в*
6П3С	Лучевой тетрод подогревный, две лампы в режиме А	6,3	1,8	250	250
				270	270
				250	250
				270	270
	То же, в режиме $АВ_1$			360	270
				360	270
				360	270
				400	250
				400	300
				400	250
				400	250
				400	300
				400	300
	То же, в режиме $АВ_2$			400	250
6С4С	Триод прямого накала, две лампы в режиме $АВ_1$	6,3	2,0	300	—
				300	—
УО-186	Триод прямого накала, две лампы в режиме $АВ_1$	4,0	2,0	400	—
				250	—
				400	—
ГМ-57	Триод прямого накала, две лампы в режиме А	4,0	4,0	500	—
				600	—

Примечания: 1. Работа с фиксированным смещением.

2. Работа с автоматическим смещением от сопротивлении $R_к$, включенного в общую цепь катодов ламп ступени.

3. Усиливаемое напряжение подается на управляющие и на экранные сетки; сопротивлении, соединяющие экранные сетки с управляющими сетками, должны быть по 10 *ком*.

4. Допустима работа только с трансформаторной связью с предоконечной ступенью; сопротивление в цепи сетки каждого плеча должно быть не более 500 *ом*.

5. Минимально необходимая мощность предоконечной ступени 100 *мвт*.

Смещение на управляющей сетке U_{c0}, в	Амплитуда напряжения между управляющими сетками U_{mcc}, в	Сопротивление смещения в цепи катодов $R_к$, ом	Анодный ток покоя I_{a0}, ма	Анодный ток при максимальной мощности $I_{a\,макс}$, ма	Ток покоя экранной сетки $I_{э0}$, ма	Ток экранной сетки при максимальной мощности $I_{э\,макс}$, ма	Оптимальное нагрузочное сопротивление между анодами R_{aa}, ком	Максимальная отдаваемая мощность $P_{макс}$, вт	Коэффициент нелинейности γ, %	Примечания
—	35,6	125	120	130	10	15	5	13,5	2	2
—	40	125	134	145	11	17	5	18	2	2
16	32	—	120	140	10	16	5	14,5	2	1
17,5	35	—	134	155	11	17	5	17	2	1
—	57	250	88	100	5	17	9	24	4	2
22,5	45	—	88	140	5	11	3,8	18	2	1
22,5	45	—	88	132	5	15	6,6	26	2	1
—	44	190	96	110	4,6	11	8,5	24	2	2
—	57	200	112	128	7	16	6,6	32	2	2
20	40	—	88	124	4	12	8,5	26	2	1
20	40	—	88	126	4	9	6	20	1	1
25	50	—	102	152	6	17	6,6	34	2	1
25	50	—	102	156	6	12	3,8	23	0,6	1
20	57	—	88	168	4	13	6	40	—	1; 4; 7
—	—	780	80	—	—	—	5	10	5	2
62	—	—	80	—	—	—	3	15	2,5	1
—	—	1 000	55	—	—	—	8	7,5	3	2
45	—	—	55	—	—	—	3	4,8	3	1
85	—	—	47	—	—	—	3	14,5	3	1
35	70	—	200	—	—	—	8	12	3	1
50	100	—	160	—	—	—	10	19	3	1

6. Минимально необходимая мощность предоконечной ступени 350 *мвт.*
7. Минимально необходимая мощность предоконечной ступени 180 *мвт.*
8. Минимально необходимая мощность предоконечной ступени 60 *мвт.*
9. Минимально необходимая мощность предоконечной ступени 600 *мвт.*

Токи и отдаваемая мощность указаны для ступени в целом, т. е. для ступеней, работающих с пентодами, лучевыми тетродами или триодами, — для двух ламп, а для ступеней с двойными триодами — для одной лампы.

уменьшается напряжение на сетке лампы одного плеча, на такую же величину увеличивается или уменьшается и напряжение на сетке лампы второго плеча ступени (напряжение пульсаций действует на обе сетки в фазе). В те моменты, когда увеличивается или уменьшается анодный ток одного плеча, соответственно увеличивается или уменьшается анодный ток другого плеча. Одновременно изменяется ток в обоих плечах и вследствие пульсации анодного напряжения (и напряжений экранных сеток пентодов или тетродов).

Увеличение или уменьшение намагничивания сердечника выходного трансформатора ступени, вызванное изменениями анодного тока, протекающего через одну половину первичной обмотки, уничтожается в любой момент времени вследствие того, что одновременно происходит равное по величине увеличение или уменьшение противоположного намагничивания сердечника за счет изменения анодного тока, проходящего через вторую половину этой обмотки. Таким образом, изменения напряжения на сетках и на анодах ламп под действием пульсации напряжения сеточного смещения и анодного напряжения не изменяют намагничивания сердечника выходного трансформатора и в его вторичной обмотке не индуктируются переменные напряжения с частотой пульсации или, если лампы в плече не вполне однородны, эти переменные напряжения получаются незначительными.

Вследствие такой компенсации пульсаций выпрямитель, питающий двухтактный усилитель, может давать напряжение с большей пульсацией, чем выпрямитель, предназначенный для питания усилителей по обычным схемам. Другими словами, в фильтре выпрямителя, питающего двухтактный усилитель, можно применять дроссели с меньшей индуктивностью и конденсаторы меньшей емкости.

Применение ламп прямого накала. По той же причине в двухтактной схеме возможно применять лампы с прямым накалом даже при питании переменным током. Неравномерность излучения электронов нитями ламп здесь не вызывает практически напряжения фона на вторичной обмотке выходного трансформатора. В этом случае сопротивление смещения (в случае фиксированного смещения отрицательный полюс источника анодного напряжения и положительный полюс источника напряжения смещения) присоединяется к отводу от среднего витка обмотки накала ламп (фиг. 22,*а*), т. е. к такой точке, напряжение на которой относительно концов обмотки всегда равно нулю. Таким способом избавляются от попадания переменного напряжения

накала в цепи управляющих сеток и анодов ламп двухтактной ступени и, следовательно, исключают пульсации анодного тока от действия переменного напряжения накала.

Расчет выходного трансформатора. При расчете выходного трансформатора для двухтактной ступени нужно принимать во внимание, что сопротивление нагрузки, «пересчитанное» в цепь первичной обмотки трансформатора, т. е. величина $\frac{r_н}{n^2}$, относится к анодным цепям двух плеч ступени. Ввиду того что концы первичной обмотки выходного трансформатора включены на аноды ламп, можно считать, что эта «пересчитанная» нагрузка для переменной составляющей тока включена между анодами ламп двух плеч ступени. В табл. 10 приведены величины «оптимальных» нагрузочных сопротивлений между анодами для ламп различных типов. В отличие от нагрузочного сопротивления анодной цепи однотактной ступени, обозначаемого R_a, нагрузочное сопротивление между анодами двухтактной ступени обозначается R_{aa}.

Пользование готовыми величинами R_{aa} из табл. 10 позволяет упростить расчет выходного трансформатора двухтактной ступени. Так же как и при расчете одноламповой ступени, прежде всего определяют необходимую индуктивность первичной обмотки трансформатора в генри по формуле

$$L_{\text{I}} = L_0 R_{aa}. \tag{23}$$

Коэффициент L_0 находят по графику фиг. 13 по заданной низшей частоте полосы пропускания и допускаемому уменьшению усиления при этой частоте в децибелах. Далее определяют минимальный объем сердечника трансформатора в кубических сантиметрах по формуле

$$V_c = \frac{(40 \div 80)\, U_{m\text{I}}^2}{f_{низ}^2 L_{\text{I}}}, \tag{24}$$

где $U_{m\text{I}}$ — амплитуда переменной составляющей напряжения на первичной обмотке трансформатора ($U_{m\text{I}} = 1{,}41\sqrt{P_{макс} R_{aa}}$);

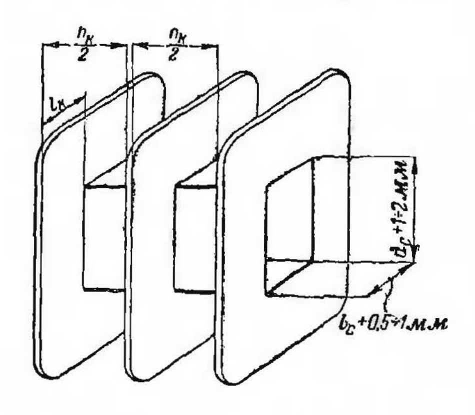
$f_{низ}$ — низшая частота полосы пропускания, *гц*.

При мощности $P_{макс} \leqslant 20$ *вт* подставляют в знаменатель коэффициент 80, соответствующий максимальной маг-

нитной индукции около 4 000 *гс*; при больших мощностях берут меньшие коэффициенты, что ведет к увеличению магнитной индукции в сердечнике (коэффициент 40 соответствует максимальной допустимой магнитной индукции около 6 000 *гс*).

Выбрав по табл. 3 на стр. 54—57 сердечник с объемом не меньше полученного расчетом и определив по той же таблице его сечение Q_c' и среднюю длину магнитной силовой линии $l_м$, находят числа витков первичной и вторичной обмоток по формулам (13) и (14), подставляя в формулу (13) коэффициент $F = 450$.

Диаметры проводов обмоток находят по формулам (15) и (16). Так как по виткам каждой половины первичной обмотки течет ток одного плеча, в формулу (15) подставляют постоянную составляющую тока I_{a0} вдвое меньшую, чем указано в табл. 10. Если ступень работает в режиме АВ, нужно брать при расчете максимальный ток, получающийся в момент отдачи ступенью максимальной мощности.



Фиг. 26. Каркас для обмоток трансформатора двухтактной ступени.

Возможность размещения обмоток на каркасе проверяется по формуле (17).

Намотку выходного трансформатора двухтактной ступени рекомендуется производить на двухсекционном каркасе (фиг. 26). Сначала в одну секцию каркаса наматывается половина первичной обмотки. Потом каркас переворачивается и в другую секцию наматывается ровно такое же число витков, которые образуют вторую половину этой обмотки. Если соединить между собой наружные концы обеих секций, одна половина обмотки будет являться продолжением другой. Внутренние выводы присоединяются к анодам лампы, а на соединенные вместе внешние подается плюс анодного напряжения. Если трансформатор предназначается для работы на электродинамический громкоговоритель

(когда вторичная обмотка имеет относительно небольшое число витков), то в одну секцию наматывается половина вторичной обмотки и затем, не обрывая провода, во вторую секцию — остальные ее витки. Если же усилитель предназначается для работы на радиотрансляционную сеть, когда вторичная обмотка должна иметь относительно большое число витков, лучше эту обмотку намотать таким же способом, как и первичную.

Емкость корректирующего конденсатора выбирается таким же образом, как и при расчете одноламповой ступени, но только при этом вместо величины R_a следует брать величину R_{aa}. При выборе типа корректирующего конденсатора необходимо учитывать, что его рабочее напряжение должно превышать по крайней мере в два раза анодное напряжение данной двухтактной ступени.

Схемы связи между двухтактными ступенями. Предоконечную ступень, в особенности если оконечная ступень работает в режиме AB_2, иногда также строят по двухтактной схеме. С целью сокращения числа ламп в схеме предоконечная ступень часто выполняется на двойном триоде. Первичная обмотка входного трансформатора Tp_2 оконечной ступени (фиг. 27,*а*) должна при этом иметь отвод от средней точки. В такой схеме входной трансформатор оконечной ступени одновременно является выходным трансформатором предоконечной ступени. Вторичная обмотка входного трансформатора Tp_1 предоконечной ступени также должна иметь вывод от средней точки.

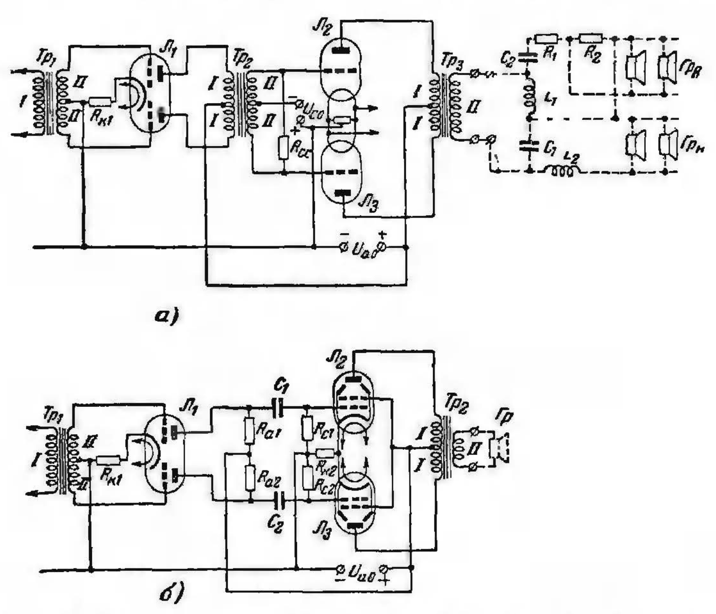
Иногда связь между двухтактными ступенями осуществляется при помощи сопротивлений и конденсаторов (фиг. 27,*б*). В такой схеме напряжения н. ч. из анодных цепей плеч предыдущей ступени передаются в цепи сеток ламп последующей ступени таким же образом, как в обычной схеме на сопротивлениях.

Выходное устройство усилителя высшего класса. Выходные ступени усилителей специальных установок, предназначенных для высококачественного звуковоспроизведения, как правило, выполняются по двухтактным схемам. Как мы уже говорили выше, на выходы таких усилителей включается по два или больше громкоговорителей, часть которых служит для воспроизведения нижних, а другая — для воспроизведения верхних частот звукового диапазона *. Чтобы

* В данном случае к верхним частотам мы относим также часть наиболее высоких частот из средних (например, выше 500 *гц*), а к нижним частотам, кроме того, и остальные средние, (например, ниже 500 *гц*).

разделить эти две полосы частот между соответствующими громкоговорителями, последние включаются на выходы усилителей через специальные устройства (фильтры).

Одна из простейших возможных схем разделения частот показана пунктиром на фиг. 27,*а*. Здесь параллельно вторичной обмотке *II* выходного трансформатора $Тр_3$ включены



Фиг. 27. Схемы усилителей с двумя двухтактными ступенями.
а — с трансформаторной связью между ступенями (справа показано включение громкоговорителей двухполосной системы); *б* — со связью между ступенями на сопротивлениях.

последовательно соединенные конденсатор C_1 и катушка индуктивности L_1. К обкладкам конденсатора C_1 через катушку индуктивности L_2 подключены громкоговорители $Гр_н$, предназначенные для воспроизведения полосы нижних частот, а к концам катушки L_1 через конденсатор C_2 и делитель напряжения, состоящий из сопротивлений R_1 и R_2, подключены громкоговорители $Гр_в$ предназначенные для воспроизведения полосы верхних частот. С понижением частоты выходного переменного напряжения емкостное сопротивление конденсатора C_1 повышается, вследствие чего падение напряжения на нем увеличивается. К тому же с понижением частоты уменьшается сопротивление катушки

L_2 и пропускание ею переменного тока соответственно улучшается. В результате при определенном подборе входящих в устройство индуктивностей и емкостей через громкоговорители $Гр_н$ пройдут практически только переменные токи с частотами, соответствующими полосе нижних частот (колебания, соответствуюшие полосе верхних частот, почти полностью будут задержаны катушкой L_2). В то же время с повышением частоты выходного переменного напряжения сопротивление катушки L_1 увеличивается, вследствие чего падение напряжения на ней также возрастает. Одновременно с этим уменьшается сопротивление конденсатора C_2 и пропускание им переменного тока улучшается. В результате на громкоговорители $Гр_в$ пройдут практически только переменные токи с частотами, соответствующими полосе верхних частот (колебания, соответствующие полосе нижних частот, почти полностью будут задержаны конденсатором C_2). Таким образом, каждая группа громкоговорителей $Гр_в$ и $Гр_н$ воспроизводит только частоты своей полосы.

Делитель напряжения, составленный из сопротивлений R_1 и R_2, служит для уменьшения мощности, подводимой к громкоговорителям, воспроизводящим верхние частоты. Это необходимо потому, что чувствительность последних в силу их конструктивных особенностей всегда получается большей, чем чувствительность громкоговорителей, рассчитанных на воспроизведение нижних частот. Если громкоговорители $Гр_в$ включать без делителя, то при воспроизведении передачи будет заметно преобладание верхних частот.

11. ФАЗОПЕРЕВОРАЧИВАЮЩИЕ СТУПЕНИ

Связь однотактной ступени усиления н. ч. с двухтактной ступенью может быть осуществлена без трансформатора с помощью так называемой фазопереворачивающей (фазоинверсной) ступени. Основными преимуществами последней являются: 1) меньшая стоимость; 2) лучшая равномерность пропускания частот вследствие отсутствия в схеме дополнительных трансформаторов.

Фазопереворачивающая ступень в качестве предоконечной может быть применена во всех случаях, когда оконечная ступень работает в режимах класса А или AB_1.

Фазопереворачивающая ступень с двойным триодом. Действие фазопереворачивающих ступеней, показанных на фиг. 28, основано на известном свойстве схемы с электронной лампой (работающей с отрицательным смещением на

управляющей сетке и с активным сопротивлением в анодной цепи), заключающемся в том, что при уменьшении результирующего отрицательного напряжения на управляющей сетке во время положительного полупериода переменного напряжения н. ч. положительное напряжение на аноде уменьшается и, наоборот, при увеличении результирующего напряжения на сетке лампы во время отрицательного полупериода положительное напряжение на аноде возрастает. Другими словами, изменение напряжения на управляющей сетке противоположно по фазе изменению напряжения на аноде лампы.

Фиг. 28. Схемы фазопереворачивающих ступеней с двойными триодами.

В фазопереворачивающей ступени, показанной на фиг. 28,*а*, применен двойной триод $Л_1$, а в оконечной — два лучевых тетрода $Л_2$ и $Л_3$ (вместо них, конечно, могут стоять пентоды или триоды). Подлежащее усилению переменное напряжение н. ч. через конденсатор C_3 подается на сетку c_1 двойного триода $Л_1$. Сопротивление R_6 является сопротивлением цепи этой сетки, а с сопротивления R_7 подается смещение на сетку. Под действием переменного напряжения на сетке c_1 получается усиленное переменное напряжение на сопротивлении R_1, включенном в цепь анода a_1. Это напряжение, как в обычной схеме на сопротивлениях, подается через конденсатор C_1 в цепь управляющей сетки лампы $Л_2$ двухтактной ступени.

Параллельно сопротивлению R_3 цепи управляющей сетки лампы $Л_2$ включены два последовательно соединенных сопротивления R_8 и R_9. Следовательно, некоторая часть

усиленного напряжения, поступающего в цепь управляющей сетки лампы $Л_2$, приходится на сопротивление R_8, а другая часть — на сопротивление R_9. Величины последних подобраны таким образом, что на сопротивлении R_8 получается переменное напряжение с амплитудой, равной амплитуде напряжения, поступающего на сетку c_1 лампы $Л_1$. Общая точка сопротивлений R_8 и R_9 соединена с управляющей сеткой c_2 этой же лампы, вследствие чего переменное напряжение с сопротивления R_8 поступает на эту сетку. Это напряжение противоположно по фазе напряжению, подведенному к сетке c_1.

От действия переменного напряжения на сетку c_2 лампы $Л_1$ получается усиленное переменное напряжение на сопротивлении R_2, включенном в цепь анода a_2. Это переменное напряжение через конденсатор C_2 передается в цепь управляющей сетки лампы $Л_3$ таким же образом, как в обычной схеме связи на сопротивлениях. В цепь этой сетки включено сопротивление R_4. Вследствие того что напряжение на сетке c_2 двойного триода $Л_1$ противоположно по фазе напряжению на его сетке c_1, напряжение на управляющей сетке лампы $Л_3$ также будет противоположно по фазе напряжению на сетке лампы $Л_2$. С другой стороны, так как на сетках c_1 и c_2 двойного триода имеются напряжения с одинаковыми по величине амплитудами и обе половины двойного триода дают одинаковое усиление, на управляющих сетках ламп $Л_2$ и $Л_3$ получаются одинаковые амплитуды.

Автоматическое смещение на сетки ламп $Л_2$ и $Л_3$ получается с помощью сопротивления R_5.

На фиг. 28,*б* показан вариант схемы фиг. 28,*а*. Здесь переменное напряжение на сетку c_2 лампы $Л_1$ также подается с сопротивления R_8, но последнее включено последовательно с сопротивлением R_3. Величины R_3 и R_8 подобраны совместно таким образом, что на сетку c_2 поступает переменное напряжение такой же величины, что и на сетку c_1, но в противоположной фазе. Все прочие сопротивления и конденсаторы, имеющие в схеме фиг. 28,*б* одинаковые обозначения со схемой фиг. 28,*а*, выполняют в обеих схемах одни и те же функции.

Расчет фазопереворачивающей ступени. Расчет элементов фазопереворачивающей ступени по схеме фиг. 28,*б* производится следующим образом. Для выбранной лампы при заданных величинах $R_1 = R_2 = R_a$ и $R_4 = R_{c2}$ по табл. 5 и 7 (стр. 68 и 73) находим емкости переходных конденсаторов

$C_1 = C_2 = C$ и коэффициент усиления ступени K. В случае применения в фазопереворачивающей ступени двойного триода 6Н8С или 6Н9С его катоды соединяются между собой и величина сопротивления смещения $R_7 = R_к$ берется вдвое меньше приведенной в соответствующей графе табл. 5; в случае же применения двойного триода 6Н7С сопротивление $R_к$ должно иметь величину, указанную в табл. 5.

Сопротивления R_8 и R_3 должны иметь величины

$$R_8 = R_4/K;\ R_3 = R_4 - R_8, \qquad (25)$$

где $R_4 = R_{c2}$, найденному по табл. 5.

Для фазопереворачивающей ступени по схеме фиг. 28,*а* несколько иначе рассчитываются величины сопротивлений R_3, R_8 и R_9. Выбрав по табл. 5 величины сопротивлений

$$R_1 = R_2 = R_a \text{ и } R_4 = R_{c2}$$

и задавшись величиной сопротивления R_8 таким образом, чтобы она была равна величине R_6 или несколько меньше, вычисляют величины R_9 и R_3:

$$R_9 = R_8(K-1);\ R_3 = \frac{R_4(R_8 + R_9)}{R_8 + R_9 - R_4}. \qquad (26)$$

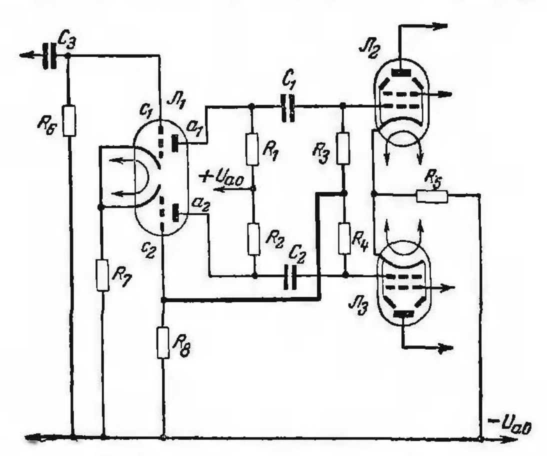
В фазопереворачивающих ступенях по схемам фиг. 28 вместо двойных триодов могут быть применены отдельные триоды или пентоды.

Самобалансирующаяся фазопереворачивающая ступень. Фазопереворачивающая ступень по любой из схем фиг. 28 обладает тем недостатком, что в случае, если усиление, даваемое разными ее плечами, не одинаково (вследствие производственной неоднородности триодов, сопротивлений R_1, R_2 и других входящих в нее элементов), то на сетках ламп оконечной ступени получаются неодинаковые амплитуды напряжения н. ч. Это может привести к увеличению нелинейных искажений в оконечной ступени.

От этого недостатка свободны так называемые *самобалансирующиеся* схемы фазопереворачивающих ступеней, наиболее распространенный вариант которых показан на фиг. 29. От предыдущих последняя схема отличается тем, что сетка c_2 ее двойного триода $Л_1$ подключена к общей точке сопротивлений R_3, R_4 и, кроме того, эта сетка соединена через сопротивление R_8 с отрицательным полюсом источника анодного напряжения. Таким образом, через сопро-

тивление R_8 поступает отрицательное смещение не только на сетку c_2 лампы $Л_1$ с сопротивления R_7 (как в обеих предыдущих схемах), но и смещение на управляющие сетки ламп $Л_2$ и $Л_3$ оконечной ступени с сопротивления R_5.

Чтобы самобалансирование такой схемы было наиболее эффективным, величина сопротивления R_3 выбирается обычно на 15—25% меньше сопротивления R_4, а величина сопротивления R_8 такого же порядка, как у сопротивлений



Фиг. 29. Схема самобалансирующейся фазопереворачивающей ступени.

R_4 и R_3 или несколько меньше. При этом потенциал точки соединения сопротивлений R_3 и R_4, а следовательно, и потенциал сетки c_2 двойного триода, изменяется в фазе с потенциалом анода a_1, т. е. в противофазе с изменениями потенциала сетки c_1 двойного триода. Это и требуется, как мы знаем, для работы фазопереворачивающей ступени.

Самобалансирование фазопереворачивающей ступени по схеме фиг. 29 происходит именно потому, что сетка c_2 ее двойного триода присоединена к общей точке сопротивлений R_3 и R_4. Вследствие этого изменения потенциала указанной точки определяются работой обоих плеч фазопереворачивающей ступени (в схемах фиг. 28 изменения потенциала на сетке вызываются только работой верхнего плеча этой ступени).

Если, например, усиление, даваемое нижним плечом фазопереворачивающей ступени по схеме фиг. 29, почему-либо начнет уменьшаться, то амплитуда напряжения на сопро-

тивлении R_2 сделается меньше амплитуды напряжения на сопротивлении R_1. Очевидно, что такая разбалансировка приведет к перераспределению напряжений и между сопротивлениями R_4 и R_3. Вследствие этого амплитуда напряжения в цепи сетки c_2 двойного триода $Л_1$ увеличится. В результате увеличится и амплитуда напряжения на сопротивлении R_2. Следовательно, схема будет стремиться самосбалансироваться. Очевидно, что то же произойдет, если вследствие увеличения усиления верхнего плеча фазопереворачивающей ступени амплитуда напряжения на сопротивлении R_1 превысит амплитуду напряжения на сопротивлении R_2. Аналогичным же образом произойдет самобалансирование схемы, если будет уменьшаться усиление верхнего или увеличиваться усиление нижнего плеча фазопереворачивающей ступени.

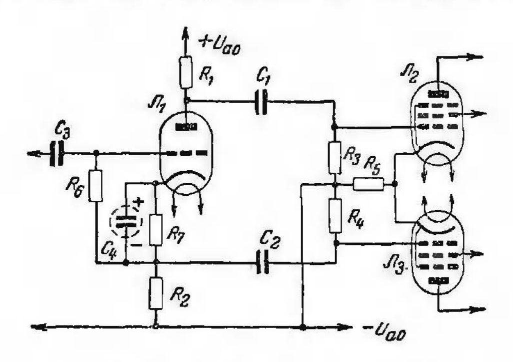
Следует отметить, что величины сопротивлений R_3, R_4 и R_8 в схеме фиг. 29 не критичны; необходимая амплитуда напряжения на сетке c_2 двойного триода автоматически устанавливается, и самобалансирование схемы осуществляется даже и в тех случаях, когда эти сопротивления взяты одинаковой величины.

Фазопереворачивающая ступень на одиночном триоде. Иногда фазопереворачивающая ступень выполняется с одной трехэлектродной лампой по схеме, показанной на фиг. 30. Схема этой ступени отличается от схемы обычной ступени усиления на сопротивлениях тем, что анодная нагрузка ее лампы $Л_1$ разделена на две части: сопротивление R_1 включено между положительным полюсом источника анодного напряжения и анодом лампы, а другое R_2 — между отрицательным полюсом того же источника и катодом. Сопротивление R_7, шунтированное конденсатором C_4, служит для подачи отрицательного смещения на управляющую сетку лампы $Л_1$. Управляющая сетка лампы $Л_2$ одного плеча оконечной ступени соединена с анодом лампы $Л_1$ через конденсатор C_1, а управляющая сетка лампы $Л_3$ другого плеча с катодом лампы $Л_1$ — через конденсаторы C_2, C_4 и сопротивление R_7.

Напряжение источника анодного питания распределяется между сопротивлением R_1, внутренним сопротивлением лампы $Л_1$ и сопротивлением R_2 (падением напряжения на сопротивлении смещения R_7 можно пренебречь, так как оно мало по сравнению с падением напряжения в сопротивлениях R_1 и R_2). Очевидно, что напряжение на аноде лампы $Л_1$ будет более положительным, чем напряжение на ее катоде. При отсутствии переменного напряжения в цепи сетки

лампы $Л_1$ все эти напряжения будут постоянными, определяемыми током покоя лампы $Л_1$.

Во время отрицательных полупериодов переменного напряжения н. ч., поступающего на сетку лампы $Л_1$, ее анодный ток, как обычно, будет уменьшаться, и падение напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 будет меньше, чем в положении покоя. Очевидно, что вследствие уменьшения падения напряжения на сопротивлении R_1 напряжение на аноде лампы $Л_1$ возрастет, т. е. сделается «более положительным»; вследствие же уменьшения падения напряжения на сопротивлении R_2 напряжение на катоде лампы $Л_1$ по



Фиг. 30. Схема фазопереворачивающей ступени с одиночным триодом.

отношению к заземленному отрицательному полюсу источника анодного питания уменьшится, т. е. сделается «более отрицательным». Во время положительных полупериодов напряжения н. ч., поступающего на сетку лампы $Л_1$, ток в ее анодной цепи будет возрастать, вызывая увеличение падения напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 по сравнению с положением покоя. Очевидно, что при этом напряжение на аноде лампы $Л_1$ будет уменьшаться — делаться более отрицательным, а напряжение на катоде лампы возрастать — делаться «более положительным». Следовательно от действия переменного напряжения на сетку лампы $Л_1$ напряжения на ее аноде и катоде будут всегда изменяться в противоположные стороны, будут противоположны по фазе.

Вследствие того что управляющая сетка лампы $Л_2$ получает переменное напряжение с анода лампы $Л_1$, а управляющая сетка лампы $Л_3$ — с катода лампы $Л_1$, напряжения

на этих сетках также всегда будут противоположны по фазе, что и необходимо для нормальной работы двухтактной ступени. Следует отметить, что фазопереворачивающая ступень по схеме фиг. 30 не дает усиления: напряжение, поступающее на каждую из управляющих сеток ламп оконечной ступени, никогда не превышает напряжения, поступающего на лампу $Л_1$ от предыдущей ступени. Происходит это потому, что включение сопротивления R_2 в цепь катода лампы $Л_1$ создает отрицательную обратную связь на сетку этой лампы.

12. ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

В усилителях н. ч. часто применяется *отрицательная обратная связь* (противосвязь), позволяющая: а) уменьшать создаваемые усилителем нелинейные искажения; б) делать более равномерным усиление различных частот в пределах необходимой полосы частот; в) при одних и тех же лампах и источниках питания получать от усилителя бóльшую мощность при том же коэффициенте нелинейности, что и без обратной связи; г) уменьшать фон при питании усилителя от сети переменного тока.

Схемы обратной связи. Принцип обратной связи заключается в том, что электрические колебания с выхода усилителя н. ч. или из анодной цепи лампы какой-либо его ступени передаются в цепь сетки этой ступени или в какую-либо цепь одной из предыдущих ступеней.

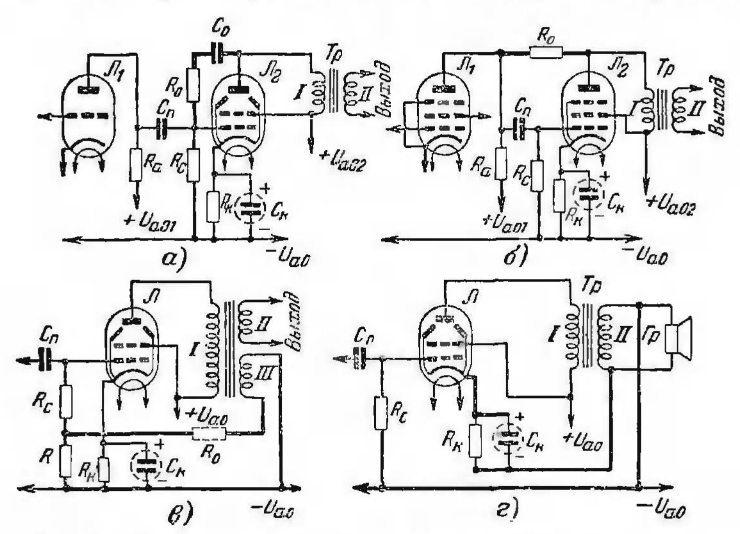
Ввиду того что нелинейные искажения возникают главным образом в оконечной ступени усилителя н. ч. и ослабление их является одной из главнейших задач введения отрицательной обратной связи, она чаще всего подается из анодной цепи этой ступени или со вторичной обмотки выходного трансформатора усилителя.

Одна из простейших схем оконечной ступени усилителя н. ч. с отрицательной обратной связью показана на фиг. 31,*а*. Здесь анод лампы соединен с ее управляющей сеткой через конденсатор C_o и сопротивление R_o. Через них колебания н. ч. поступают из анодной цепи лампы в цепь ее управляющей сетки.

Конденсатор C_o здесь необходим только для того, чтобы преградить путь высокому анодному напряжению в цепь управляющей сетки лампы. Его емкостное сопротивление на самых низких частотах должно быть значительно меньше величин сопротивлений R_c и R_o. Для обеспечения

этого он должен обладать емкостью порядка сотых или десятых долей микрофарады и, кроме того, иметь незначительную утечку.

Если в анодной цепи возникнут гармоники, то они вместе с колебаниями основной частоты через C_0 и R_0 поступят в цепь управляющей сетки лампы. От действия этих напряжений в цепи управляющей сетки лампы в ее анодной цепи возникнут переменные составляющие напряжений



Фиг. 31. Схемы ступеней с отрицательной обратной связью:

а и *б* — напряжение обратной связи подается на анодной цепи лампы; *в* — напряжение обратной связи подается со специальной обмотки выходного трансформатора; *г* — напряжение обратной связи подается в цепь катода со вторичной обмотки выходного трансформатора, на которую включен громкоговоритель.

с теми же частотами, но последние будут противоположны по фазе вызвавшим их переменным напряжениям. Предположим, например, что напряжение переменной составляющей с частотой какой-либо из гармоник в некоторый момент времени на аноде увеличивается. Это изменение напряжения через конденсатор C_o и сопротивление R_o будет передано в цепь управляющей сетки и вызовет уменьшение отрицательного напряжения на ней. Уменьшение отрицательного напряжения на сетке поведет к увеличению анодного тока и к уменьшению напряжения на аноде. Итак, вследствие наличия в схеме элементов обратной связи C_o и R_o увеличение напряжения на аноде привело к уменьше-

нию напряжения на нем. В результате мы получим увеличение напряжения на аноде на меньшую величину, чем при отсутствии C_o и R_o, и эта гармоника будет ослаблена. Точно так же будут ослаблены в анодной цепи и напряжения других гармоник, а также и напряжение основной частоты, подведенной к управляющей сетке оконечной ступени от предварительного усилителя. Иначе говоря, ослабление гармоник и вызываемых ими нелинейных искажений сопровождается уменьшением усиления ступени. Чтобы получить в ее анодной цепи необходимую мощность, приходится увеличивать напряжение н. ч., подаваемое на управляющую сетку лампы от предварительной ступени. Поэтому при наличии отрицательной обратной связи предварительные ступени должны давать большее усиление, чем при отсутствии обратной связи.

Применяя отрицательную обратную связь, можно получить на выходе усилителя такую же мощность колебаний н. ч., но при меньшем коэффициенте нелинейности.

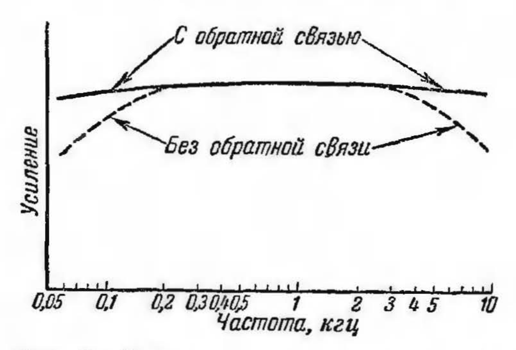
Увеличивая еще больше амплитуду напряжения н. ч. на управляющей сетке ступени, получим увеличение выходной мощности при одновременном росте коэффициента нелинейности. В результате можно получить бо́льшую выходную мощность с таким же коэффициентом нелинейности, который имел усилитель, отдавая меньшую мощность, когда в нем не было отрицательной обратной связи. Возможно, что для получения большей выходной мощности придется зайти на сгиб характеристики и в область сеточных токов. Однако возникающие вследствие этого искажения также будут уменьшены действием обратной связи.

Теперь посмотрим, почему отрицательная обратная связь дает улучшение частотной характеристики усилителя. На частотах, которые лучше усиливаются, в анодной цепи лампы имеются напряжения с большей амплитудой. Соответственно цепь управляющей сетки лампы получит через конденсатор C_o и сопротивление R_o большее напряжение. На других частотах, которые усиливаются хуже, амплитуды напряжения в анодной цепи будут меньше, значит меньшее напряжение поступит через C_o и R_o и в цепь управляющей сетки.

Вследствие этого в первом случае обратная связь уменьшит усиление на большую величину, чем во втором случае, и результирующее усиление тех и других частот будет более равномерным (фиг. 32).

Схема фиг. 31,*б* отличается от схемы фиг. 31,*а* тем, что в ней отсутствует конденсатор C_o. Здесь через сопротивление R_o соединены между собой аноды ламп предоконечной и оконечной ступеней и напряжение обратной связи поступает из анодной цепи лампы оконечной ступени в цепь ее управляющей сетки через сопротивление R_o и далее через конденсатор $C_п$ вместе с напряжением н. ч. от предоконечной ступени.

В схеме фиг. 31,*в* выходной трансформатор *Тр* имеет дополнительную обмотку *III*, носящую название обмотки обратной связи. Напряжение с обмотки *III* подается на



Фиг. 32. Частотные характеристики ступени усиления с отрицательной обратной связью и без нее.

управляющую сетку лампы и вызывает в ее анодной цепи переменные напряжения, противоположные по фазе, т. е. действие этой схемы подобно действию предыдущих схем.

Для осуществления отрицательной обратной связи в усилителе, работающем на электродинамический громкоговоритель, вообще говоря, нет необходимости иметь на выходном трансформаторе специальную третью обмотку. В качестве напряжения обратной связи можно использовать частично или полностью напряжение, получающееся на вторичной обмотке *II*, к которой подключен громкоговоритель. При этом, как и в схеме фиг. 31,*в*, в цепь управляющей сетки включается сопротивление *R*, верхний конец которого через сопротивление R_o соединяется с концом вторичной обмотки выходного трансформатора. Другой конец этой обмотки соединяется с отрицательным полюсом источника анодного питания. Подбирая соотношение вели-

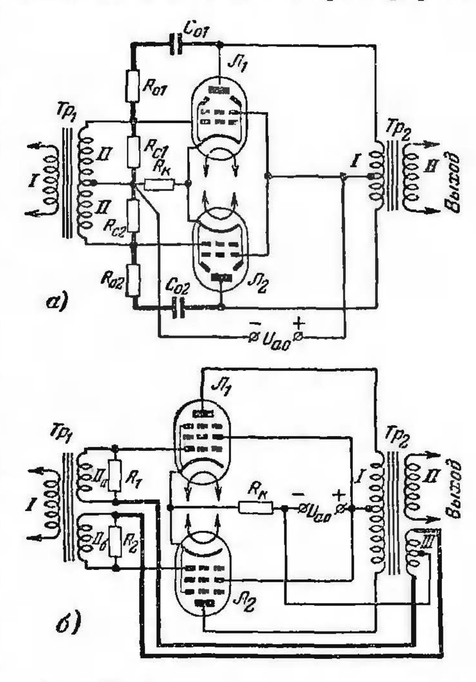
чин сопротивлений R и R_o, можно изменять величину напряжения обратной связи, поступающего в цепь управляющей сетки. Так как напряжение на вторичной обмотке выходного трансформатора, к которой подключается звуковая катушка динамического громкоговорителя, обычно невелико, то в ряде практических случаев это напряжение можно полностью использовать в качестве напряжения отрицательной обратной связи, т. е. концы вторичной обмотки выходного трансформатора можно включить непосредственно на концы сопротивления R (без сопротивления R_o).

Очень простая в практическом осуществлении и поэтому широко распространенная схема подачи отрицательной обратной связи показана на фиг. 31,*г*. В ней вторичная обмотка *II* выходного трансформатора *Тр* включена в цепь катода лампы *Л* оконечной ступени последовательно с сопротивлением автоматического смещения $R_к$. Поэтому через указанную обмотку идет полный ток катода лампы оконечной ступени (сумма токов анода и экранной сетки) и в то же время между ее катодом и отрицательным полюсом источника анодного питания вводится полное напряжение вторичной обмотки выходного трансформатора. Это напряжение тем же путем, как напряжение автоматического смещения, и вместе с ним поступает в качестве напряжения обратной связи в цепь управляющей сетки лампы оконечной ступени.

Обратная связь в двухтактных усилителях. На фиг. 33 показаны схемы двухтактных ступеней с отрицательной обратной связью. В схеме фиг. 33,*а* обратная связь подается с анода лампы каждого плеча на ее сетку таким же способом, как и в схеме фиг. 31,*а*. В другой широко распространенной схеме, показанной на фиг. 33,*б* (принцип ее действия такой же, как и схемы, приведенной на фиг. 31,*в*), обмотка обратной связи *III* выходного трансформатора $Тр_2$ имеет отвод от средней точки, а вторичная обмотка *II* входного трансформатора $Тр_1$ состоит из двух электрически изолированных друг от друга половин *IIа* и *IIб*. Один конец обмотки *III* трансформатора $Тр_2$ соединен с половиной *IIа* вторичной обмотки трансформатора $Тр_1$, а другой конец обмотки *III* — с другой половиной *IIб* вторичной обмотки трансформатора $Тр_1$. Таким образом, напряжение обратной связи подается на управляющие сетки ламп через половины обмотки *IIа* и *IIб* и шунтирующие их сопротивления R_1 и R_2. Минус напряжения смещения присоединяется к средней точке обмотки обратной связи *III* трансформатора $Тр_2$

и поступает на управляющие сетки ламп обоих плеч через эту обмотку и половины вторичной обмотки *IIа* и *IIб* трансформатора Tp_1.

Отрицательная обратная связь в многоступенных усилителях. Во многих усилителях н. ч. напряжение отрицательной обратной связи подается с выходного трансформатора в ту или иную цепь одной из ступеней предварительного усиления. На фиг. 34,*а* для примера приведена схема подачи обратной связи с выхода усилителя н. ч. в цепь управляющей сетки предоконечной ступени, а на фиг. 34,*б* — схема подачи обратной связи со специальной обмотки выходного трансформатора в цепь катода предоконечной ступени. Существует множество вариантов схем усилителей н. ч. с отрицательной обратной связью. Во всех этих разнообразных схемах используется описанный выше принцип уменьшения нелинейных искажений, ослабления фона и улучшения частотных характеристик.

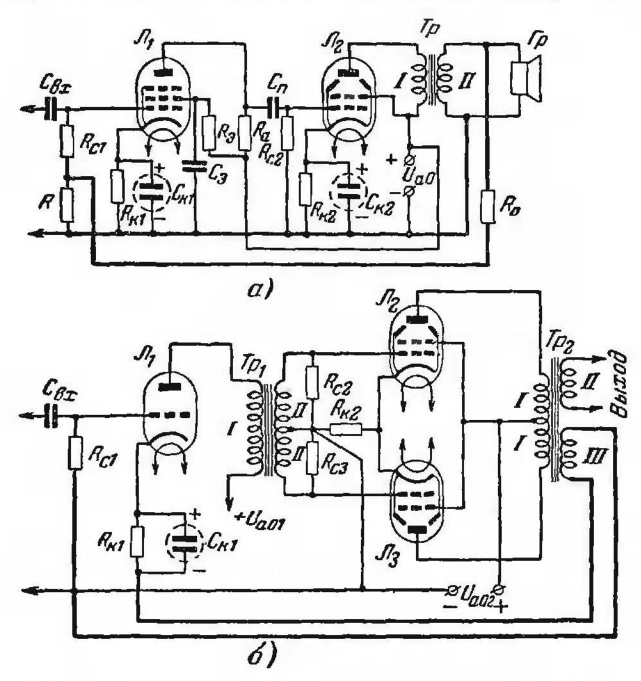


Фиг. 33. Схемы двухтактных ступеней с отрицательной обратной связью.

а — обратная связь подается из анодных цепей ламп; *б* — обратная связь подается со специальной обмотки выходного трансформатора.

Все цепи (ступени) усилителя, находящиеся между цепью, с которой снимается напряжение обратной связи, и цепью, в которую это напряжение подается, носят название цепей (ступеней), *охваченных* обратной связью. Так, например, в схемах фиг. 31,*в*, 31,*г* и 33,*б*, отрицательной обратной связью охвачены оконечные ступени вместе с выходным трансформатором, в схемах фиг. 31,*а*, 31,*б* и 33,*а* выходной трансформатор не охвачен обратной связью и в схемах фиг. 34 охвачены две ступени, включая и выходной трансформатор.

Расчет усилителя с обратной связью. Действие отрицательной обратной связи количественно характеризуется так называемым *коэффициентом обратной связи А*, который показывает, во сколько раз обратная связь уменьшает усиление ступеней, охваченных обратной связью, и соответственно во сколько раз нужно увеличить амплитуду напряжения н. ч., подаваемого на управляющую сетку лампы первой из этих ступеней, чтобы получить на выходе такую же мощ-



Фиг. 34. Схемы усилителей н. ч. с обратной связью, охватывающей две ступени.

а — с однотактной оконечной ступенью; *б* — с двухтактной оконечной ступенью.

ность, как и без обратной связи. Коэффициент обратной связи *А* позволяет также оценить уменьшение коэффициента нелинейности, ослабление фона и улучшение других качественных показателей усилителя.

Коэффициент обратной связи *А* зависит от общего коэффициента усиления ступеней, охваченных отрицательной обратной связью, и так называемого *коэффициента передачи* β. Последний показывает, какая часть напряжения, дей-

ствующего на анодной нагрузке последней ступени из числа охваченных отрицательной обратной связью, поступает как напряжение обратной связи в цепь управляющей сетки первой из числа этих ступеней.

Так, например, для схем фиг. 31,*а* и *б*, если конденсаторы $C_о$ и $C_п$ обладают настолько большой емкостью, что их емкостным сопротивлением можно пренебречь по сравнению с величинами R_a, R_c и $R_о$, а лампа $Л_1$ обладает внутренним сопротивлением R_{i1}, коэффициент передачи

$$\beta = \frac{R}{R + R_о}, \tag{27}$$

где

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_{i1}}}.$$

Для схемы фиг. 31,*в*

$$\beta = \frac{w_{III}}{w_I} \frac{R}{R + R_о}. \tag{28}$$

Между коэффициентом обратной связи A, коэффициентом усиления без обратной связи K, коэффициентом усиления того же усилителя после введения обратной связи K_β и коэффициентом передачи β имеется следующая зависимость:

$$A = \frac{K}{K_\beta} = 1 + \beta K. \tag{29}$$

Действие обратной связи на усиление (производимое ею ослабление) часто выражают в децибелах. Такая величина носит название *глубины обратной связи* и может быть вычислена по формуле

$$A_{дб} = 20 \lg (1 + \beta K). \tag{30}$$

Если обратной связью охвачено несколько ступеней, за величины K и K_β нужно принимать произведения коэффициентов усиления всех этих ступеней.

В соответствии с вышеизложенным можно написать следующие зависимости.

Усиление ступеней, охваченных обратной связью:

$$K_\beta = \frac{K}{A} = \frac{K}{1 + \beta K}. \tag{31}$$

Необходимое для получения заданной выходной мощности напряжение на входе усилителя с отрицательной обратной связью

$$U_{вх\,\beta}=U_{вх}A=U_{вх}(1+\beta K), \qquad (32)$$

где $U_{вх}$ — напряжение на входе того же усилителя без обратной связи, необходимое для получения той же выходной мощности.

Напряжение фона на выходе усилителя с отрицательной обратной связью

$$U_{ф\,\beta}=\frac{U_ф}{A}=\frac{U_ф}{1+\beta K}, \qquad (33)$$

где $U_ф$ — напряжение фона на выходе усилителя при отсутствии в нем отрицательной обратной связи.

Коэффициент нелинейности на выходе усилителя с отрицательной обратной связью

$$\gamma_\beta=\frac{\gamma}{A}=\frac{\gamma}{1+\beta K}, \qquad (34)$$

где γ — коэффициент нелинейности при той же выходной мощности, но в случае отсутствия отрицательной обратной связи.

Нужно иметь в виду, что если на ступени, охваченные обратной связью, поступает для усиления передача, уже сопровождаемая фоном, обратная связь не ослабляет этот фон (уменьшается только фон, возникающий в ступенях, охваченных отрицательной обратной связью). Точно так же, если на усилитель поступает передача с нелинейными искажениями, отрицательная обратная связь не может их уменьшить (ослабляются только искажения, возникающие в ступенях, охваченных обратной связью).

Формула (34) дает правильный результат при условии, что частотная характеристика усилителя практически прямолинейна во всей полосе усиливаемых частот (особенно в области верхних частот). Тогда для всех частот коэффициент усиления одинаков и обеспечивает неизменную величину коэффициента обратной связи в пределах полосы. Это и является необходимым условием того, чтобы все гармоники ослаблялись обратной связью одинаково, чтобы между γ_β и γ существовала указанная в формуле (34) простая зависимость. Если же, например, на верхних часто-

тах имеется «завал» частотной характеристики, свидетельствующий об уменьшении усиления K на этих частотах, для них получается и меньшая величина A, т. е. на этих частотах обратная связь будет действовать слабее. При этом отдельные гармоники, соответствующие этим частотам, будут ослабляться меньше, чем в случае прямолинейной частотной характеристики, и в результате коэффициент нелинейности может получиться даже больше.

Введение отрицательной обратной связи уменьшает и действующее внутреннее сопротивление R_i лампы ступени, охваченной обратной связью. При наличии обратной связи действующее внутреннее сопротивление лампы

$$R_{i\beta}=\frac{R_i}{A}=\frac{R_i}{1+\beta K}. \qquad (35)$$

Это обстоятельство позволяет применять в усилителях с обратной связью выходные трансформаторы с меньшей индуктивностью первичной обмотки.

Вследствие действия отрицательной обратной связи уменьшается также выходное сопротивление усилителя и поэтому напряжение на его выходе делается менее зависимым от величины нагрузки. Последнее существенно по следующим соображениям. При отключении нагрузки от усилителя (при так называемом «сбросе нарузки») или при ее уменьшении выходное напряжение усилителя всегда в большей или меньшей мере увеличивается (это явление особенно сильно выражено в усилителях без отрицательной обратной связи, в оконечных ступенях которых используются лучевые тетроды или пентоды). Если, например, нагрузка усилителя радиотрансляционного узла уменьшилась вследствие отключения части абонентских точек, то вследствие роста его выходного напряжения громкость воспроизведения передачи на оставшихся точках увеличится (что не желательно). В случае значительного возрастания напряжения на выходе усилителя н. ч., т. е. на обмотках его выходного трансформатора, вызванного отключением или уменьшением его нагрузки, может произойти пробой этих обмоток (что не допустимо). При отключении же или уменьшении нагрузки усилителя н. ч. с отрицательной обратной связью выходное напряжение возрастает меньше, чем в случае такого же усилителя без обратной связи потому, что увеличение амплитуды напряжения на выходе усилителя н. ч. приводит к увеличению амплитуды напряжения отрицательной обратной связи, поступающего в цепь сетки

соответствующей ступени этого же усилителя. Вследствие этого результирующая амплитуда напряжения в этой цепи сетки (определяемая совместным действием усиливаемого сигнала и обратной связи) уменьшается и тем самым увеличение выходного напряжения усилителя н. ч. ограничивается.

Обеспечиваемое действием отрицательной обратной связи уменьшение выходного сопротивления усилителя н. ч., нагруженного на электродинамический громкоговоритель, существенно еще и по следующей причине. Звуковая катушка громкоговорителя вместе с диффузором, как известно, представляет собой механическую колебательную систему, обладающую относительно низкой основной резонансной частотой при малом затухании. При воспроизведении короткого сигнала (звука) такая система требует некоторого времени на раскачку и продолжает некоторое время колебаться после того, как действие этого сигнала прекратилось. Этот нестационарный процесс особенно заметен, если частота приходящего сигнала близка к основной резонансной частоте подвижной системы громкоговорителя. В то же время трески, воспроизводимые громкоговорителем от действия на вход усилителя даже очень коротких электрических импульсов, звучат значительно дольше, чем длятся сами импульсы. Однако, чем меньше выходное сопротивление усилителя, тем сильнее оно шунтирует звуковую катушку громкоговорителя, тем большим становится затухание его подвижной системы и тем менее резко выраженными становятся указанные вредные явления.

Нужно также отметить, что введение в усилитель отрицательной обратной связи делает его выходное сопротивление менее зависимым от частоты.

Самовозбуждение усилителей н. ч. с отрицательной обратной связью. При некоторых условиях в схемах усилителей с обратной связью может возникнуть самовозбуждение на звуковых частотах или на частотах выше звуковых, нарушающее нормальную работу усилителей. Самовозбуждение на звуковых частотах вызывает фон (свист) в громкоговорителе, а самовозбуждение на частотах выше звуковых может привести к нелинейным искажениям. Эти неприятные явления связаны с неравномерностью частотной характеристики усилителя и вызываются следующими причинами.

Как мы уже знаем, напряжения н. ч. в цепи управляющей сетки и на анодной нагрузке каждой ступени противо-

положны по фазе, т. е. их фазы сдвинуты по отношению друг к другу на угол 180°. Такой поворот фазы имеет место в каждой ступени усиления. Кроме того, сдвиги фаз создаются в цепях усилителя, содержащих реактивные сопротивления (конденсаторы, индуктивности). В результате сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями усилителя или отдельных его ступеней определяется суммарным сдвигом фаз, создаваемым лампами и реактивными сопротивлениями. Вследствие наличия последних этот общий сдвиг фаз получается неодинаковым для различных частот. Может получиться, что для одних частот будет существовать противоположность фаз, обеспечивающая нормальное действие отрицательной обратной связи, а для некоторой звуковой или сверхзвуковой частоты фазы напряжения на выходе и входе ступеней, охваченных обратной связью, будут такими, что, для этой частоты получится не отрицательная, а положительная обратная связь, которая может вызвать самовозбуждение усилителя.

Чтобы избежать этого, рекомендуется (в радиолюбительских условиях) придерживаться следующих основных правил: а) обратная связь должна охватывать не более двух ступеней; б) коэффициент обратной связи *A* для многоступенного усилителя следует брать не более 3—5 (10—15 *дб*); в) применять переходные конденсаторы по возможности большой емкости; г) делать выходные трансформаторы с возможно меньшими индуктивностями рассеяния.

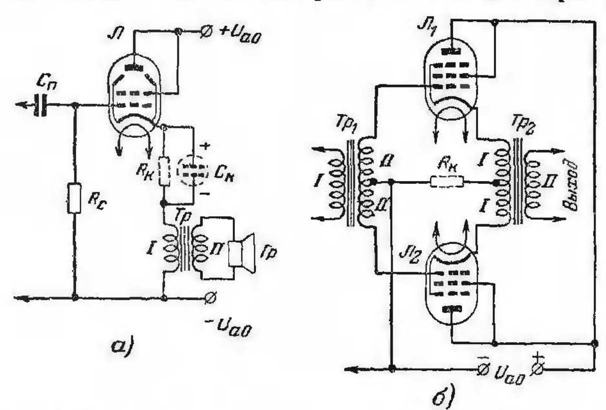
Когда обратной связью охвачена только одна ступень, самовозбуждение, как правило, возникнуть не может.

Схемы с катодной нагрузкой. Частным случаем схемы ступени с отрицательной обратной связью является схема с катодной нагрузкой.

На фиг. 35,*а* приведена схема оконечной ступени с катодной нагрузкой. Такую схему называют также схемой с катодным выходом или катодным повторителем. Здесь первичная обмотка *I* выходного трансформатора *Тр* включена между катодом лампы и отрицательным полюсом источника анодного напряжения и, следовательно, в цепь управляющей сетки лампы поступает полное напряжение н. ч., действующее на первичной обмотке выходного трансформатора. Другими словами, в ступени имеется отрицательная обратная связь с коэффициентом передачи $\beta = 1$.

Благодаря этому ступень по такой схеме вносит очень малые нелинейные искажения и имеет очень хорошую частотную характеристику. Так, например, лампа 6П3С, рабо-

тающая в этой схеме* при анодном напряжении 260 *в*, отрицательном смещении на управляющей сетке — 22 *в* и величине нагрузочного сопротивления (приведенного к первичной обмотке выходного трансформатора) 5 000 *ом*, отдает мощность $P_{макс} = 1{,}8$ *вт* при коэффициенте нелинейности менее 1%. Если же включить выходной трансформатор обычным способом и применить эту же лампу в триодном включении, то в том же режиме питания при той же



Фиг. 35. Схемы оконечных ступеней с катодной нагрузкой.
а — однотактная ступень; *б* — двухтактная ступень.

нагрузке и выходной мощности 1,4 *вт* коэффициент нелинейности будет равен 5,5%.

Недостатком ступени с катодной нагрузкой является то, что она не дает усиления по напряжению. Подставив величину $\beta = 1$ в формулу (31), нетрудно убедиться, что усиление ступени K_β при любых условиях будет меньше единицы. Следовательно, от предварительного усилителя нужно иметь напряжение н. ч. большей величины, чем напряжение, получающееся на первичной обмотке выходного трансформатора. Это обстоятельство заставляет повышать усиление предварительных ступеней. Так, например, для приведенного выше примера с лампой 6П3С от предоконечной ступени необходимо получить напряжение с амплитудой 156 *в*, в то время как на первичной обмотке выходного

* Отметим, что лучевые тетроды и пентоды, используемые в схемах с катодной нагрузкой, всегда превращаются в триоды, так как их аноды и экранные сетки должны быть подключены непосредственно к положительному полюсу источника анодного напряжения.

трансформатора будет напряжение с амплитудой 134 *в*. Вследствие того что напряжение на первичной обмотке трансформатора противоположно по фазе напряжению, поступающему с предоконечной ступени, между сеткой и катодом лампы оконечной ступени будет действовать напряжение с амплитудой 156—134 = 22 *в*, т. е. не превышающее величину отрицательного смещения на управляющей сетке. «Усиление» такой ступени по напряжению, очевидно, будет $\frac{134}{156}=0{,}86$, т. е. фактически такая ступень будет ослаблять поступающее на нее напряжение.

На фиг. 35,*б* показана схема двухтактной оконечной ступени с катодной нагрузкой. Каждое из плеч этой схемы работает так же, как и схема фиг. 35,*а*, и действие обоих плеч складывается выходным трансформатором, как и во всякой другой двухтактной схеме. Подобно тому как при расчетах обычных двухтактных схем принимают величину нагрузки между анодами R_{aa}, здесь принимают величину нагрузки между катодами, которую по аналогии можно обозначить $R_{кк}$.

Такая схема с двумя лампами 6П3С при анодном напряжении 260 *в*, смещении на управляющих сетках —30 *в* и приведенном сопротивлении нагрузки между катодами $R_{кк} = \frac{r_н}{n^2} = 6\,800$ *ом* отдает мощность 4,5 *вт* при коэффициенте нелинейности, близком к нулю. При этом ступень работает в режиме класса А. Для получения указанной мощности амплитуда напряжения на каждой половине вторичной обмотки входного трансформатора ступени должна быть 155 *в*, т. е. амплитудное значение напряжения на концах этой обмотки (между сетками) должно быть 310 *в*.

При том же анодном напряжении, если $R_{кк} = 8\,000$ *ом*, а смещение на сетке равно —37,5 *в*, амплитудное значение напряжения на концах вторичной обмотки входного трансформатора будет 430 *в* и мы получим мощность 7 *вт*. Несмотря на то, что в данном случае амплитуда напряжения между сеткой и катодом будет превышать напряжение смещения на 7,5 *в*, т. е. ступень будет работать в режиме $АБ_2$, коэффициент нелинейности составит всего 1,6%. Ступень с такой же нагрузкой, включенной между анодами при том же анодном напряжении и напряжении смещения (лампы 6П3С включены как триоды), сможет отдать мощность 6 *вт* при значительно большем коэффициенте нелинейности.

Отметим, что мощности, отдаваемые оконечными ступенями с катодными нагрузками, в меньшей мере зависят от величин сопротивлений нагрузки. Так, если приведенное сопротивление между катодами лампы 6П3С в предыдущем примере уменьшить вдвое, т. е. до 4 000 *ом*, выходная мощность возрастает с 7 до 7,35 *вт*, т. е. всего на 5%. Коэффициент нелинейности при этом увеличится с 1,6 до 2,2%.

Величина сопротивления $R_к$ в схеме фиг. 35,*а*, необходимая для получения такого же смещения, как и в обычной схеме с анодной нагрузкой, должна быть меньше на величину сопротивления R_I первичной обмотки выходного трансформатора. В двухтактной схеме по каждой половине первичной обмотки выходного трансформатора течет половина анодного тока, потребляемого ступенью, поэтому сопротивление смещения должно быть уменьшено на величину $\frac{R_I}{4}$, где R_I — сопротивление между концами первичной обмотки выходного трансформатора. В этих схемах можно обойтись без специального сопротивления смещения $R_к$, если сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора сделать такой величины, чтобы на нем получалось падение постоянного напряжения, равное необходимому напряжению смещения.

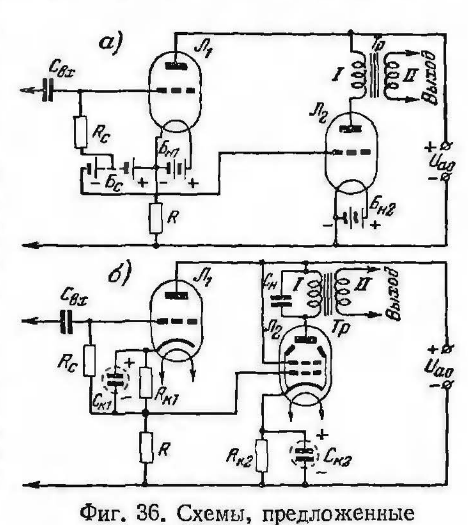
Следует подчеркнуть, что выходное сопротивление оконечной ступени с катодной нагрузкой получается очень малым. Поэтому оно сильно шунтирует звуковую катушку включенного на выход электродинамического громкоговорителя и тем самым существенно улучшает условия его работы.

Предоконечная ступень с катодной нагрузкой. За последние годы большое распространение в усилителях н. ч. большой мощности (особенно в двухтактных усилителях) получила схема П. Н. Куксенко, предложенная им еще в 1926 г.* и уже тогда пользовавшаяся большой популярностью у радиолюбителей. В этой схеме (фиг. 36,*а*) применена катодная нагрузка в предоконечной ступени (предоконечная ступень выполнена по схеме катодного повторителя), а сетка лампы оконечной ступени $Л_2$ соединена с катодом лампы $Л_1$ предоконечной ступени через батарею смещения $Б_c$. Переходной конденсатор в этой схеме отсутствует.

---

* „Радиолюбитель“ 1926, № 1 и 2.

В цепь сетки лампы $Л_1$ вводится полное напряжение н. ч., получающееся на сопротивлении R вследствие прохождения через него пульсирующего анодного тока, т. е. предоконечная ступень охвачена отрицательной обратной связью с коэффициентом передачи $\beta=1$, и ее коэффициент усиления K_β меньше единицы (предоконечная ступень не дает усиления). Сетка лампы $Л_2$ оконечной ступени получает положительный потенциал за счет падения напряжения анодного тока лампы на сопротивлении R. Поэтому напряжение батареи $Б_c$ должно быть больше напряжения смещения, необходимого для нормальной работы лампы $Л_2$, на величину падения напряжения на сопротивлении R.



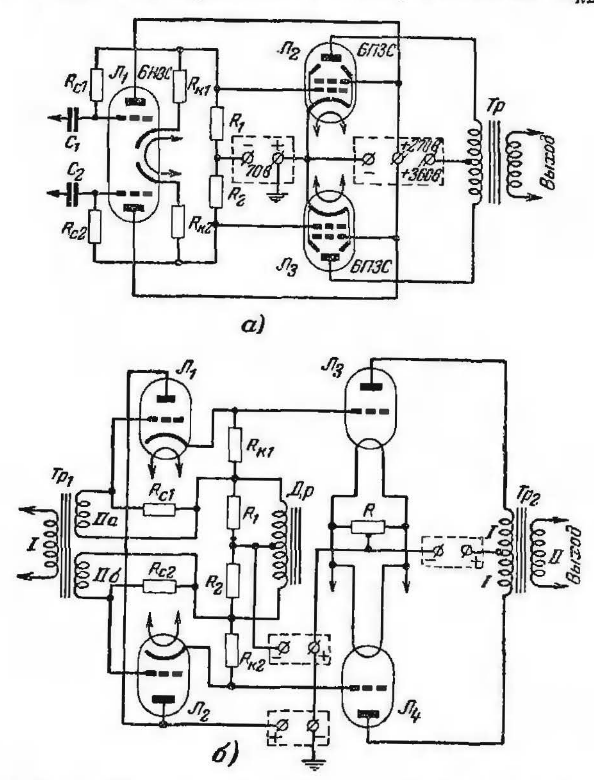
Фиг. 36. Схемы, предложенные П. Н. Куксенко.

а — с лампами прямого накала; *б* — с подогревными лампами.

Особенностью этой схемы является то, что в ней лампа оконечной ступени может работать, не создавая больших нелинейных искажений с амплитудами напряжения на сетке, превышающими постоянное смещение. Поэтому от оконечной ступени такой схемы с данной лампой можно получить бо́льшую выходную мощность, чем при каком-либо другом способе связи с предоконечной ступенью. Возникающий здесь ток сетки лампы $Л_2$ проходит по сопротивлению R в том же направлении, что и анодный ток лампы $Л_1$, т. е. эти токи совпадают по фазе. Поэтому ток сетки лампы оконечной ступени во время положительных полупериодов напряжения на ней не создает для предоконечной ступени дополнительной нагрузки, которая может быть причиной возникновения нелинейных искажений.

Схема фиг. 36, *а* неудобна при питании от батарей, так как требует отдельной батареи накала $Б_{н1}$ для лампы $Л_1$ предоконечней ступени и специальной батареи сеточного

смещения $Б_с$. Вариант схемы П. Н. Куксенко с питанием от выпрямителя показан на фиг. 36,*б*. Здесь смещение на сетку лампы $Л_1$ предоконечной ступени подается автоматически с сопротивления $R_{к1}$, а смещение на управляющую сетку лампы $Л_2$ оконечной ступени — с сопротивления $R_{к2}$. Величина падения напряжения на сопротивлении $R_{к2}$ в этой



Фиг. 37. Двухтактные схемы с катодной нагрузкой в предоконечной ступени.

схеме также должна быть выбрана с учетом того, что сетка лампы получает положительный потенциал с сопротивления R.

На фиг. 37,*а* приведена двухступенная двухтактная схема с катодными нагрузками в предоконечной ступени. Здесь анодные цепи оконечной ступени питаются от выпрямителя, дающего напряжение 360 *в*. Отрицательный полюс этого

выпрямителя заземлен. Предоконечная ступень получает анодное напряжение 270 *в* от того же выпрямителя плюс напряжение 70 *в* от второго выпрямителя, у которого заземлен положительный полюс. Таким образом, суммарное напряжение анодного питания предоконечной ступени составляет $270+70=340$ *в*. Отрицательное смещение на управляющие сетки ламп оконечной ступени — 70 *в* поступает от второго выпрямителя через сопротивления R_1 и R_2. Сетки двойного триода предоконечной ступени получают автоматическое смещение за счет падения напряжения на сопротивлениях $R_{к1}$ и $R_{к2}$. Каждое плечо схемы фиг. 37,*а* работает так же, как и схема фиг. 36,*б*. Работая в режиме класса $АБ_2$, такой усилитель с указанными на схеме фиг. 37,*а* лампами и питающими напряжениями может отдать на выходе мощность до 50 *вт*.

На фиг. 37,*б* показан вариант предыдущей схемы, отличающийся тем, что в нем в качестве катодной нагрузки предоконечной ступени используется дроссель *Др*, шунтированный сопротивлениями R_1 и R_2. В этой ступени работают две отдельные подогревные лампы, вход на предоконечную ступень осуществлен с помощью трансформатора $Тр_1$, а в оконечной ступени работают лампы прямого накала. Эта схема разработана советским инженером С. Н. Кризе и широко применяется в современных усилителях радиотрансляционных узлов большой мощности. Оконечные ступени усилителей работают в режиме $АВ_2$. В таких двухтактных усилителях, как правило, осуществляется отрицательная обратная связь.

Совместное применение катодной нагрузки в предоконечной ступени и отрицательной обратной связи, охватывающей оконечную ступень совместно с предоконечной, обеспечивает получение от ламп оконечной ступени при низком коэффициенте нелинейности такой большой мощности, какую не представляется возможным получить от усилителей, выполненных по другим известным схемам.

13. КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЕЙ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Сущность частотной коррекции. Ранее говорилось, что каждая ступень усилителя н. ч. вносит некоторые частотные искажения, и чтобы получить удовлетворительное по равномерности усиление частот с многоступенным усилителем, необходимо предъявлять более строгие требования к от-

дельным его ступеням, допуская в них значительно меньшие отклонения между усилением различных частот. Так, например, чтобы завал частотной характеристики двухступенного усилителя на частотах, соответствующих краям полосы пропускания, не превышал 3 *дб*, в каждой ступени допустимо уменьшение усиления на этих частотах только на 1,5 *дб* или в одной ступени на 1 *дб*, а в другой на 2 *дб*. Если предъявить такое же требование к трехступенному усилителю, то отдельные его ступени должны еще равномернее усиливать различные частоты.

Но практически это не всегда осуществимо. Применяя, например, в одной из ступеней готовый трансформатор, часто приходится мириться с тем, что он не позволяет получить достаточно равномерное усиление частот ступенью; обычно такая ступень имеет частотную характеристику с существенными завалами в областях верхних и нижних частот (см. фиг. 20). Если и другие ступени будут давать пониженное усиление на краях полосы пропускания, то частотная характеристика всего усилителя в целом может получиться совсем неудовлетворительной. Чтобы выравнять частотную характеристику усилителя, в подобных случаях желательно, чтобы другие его ступени давали повышенное усиление на этих частотах. Поясним это примером.

Допустим, что ступень с трансформатором имеет завал усиления при частоте 6 000 *гц* на 6 *дб* по сравнению со средними частотами полосы пропускания. Если усиление какой-либо другой ступени при частоте 6 000 *гц* сделать на 6 *дб* больше, чем на средних частотах, тогда усилитель в целом будет усиливать частоту 6 000 *гц* так же, как и средние.

Такая компенсация уменьшения (или увеличения) усиления некоторых частот в одной ступени путем увеличения (или понижения) усиления этих частот другой ступенью называется *частотной коррекцией*.

Следует отметить, что в усилителях н. ч. осуществляют коррекцию не только для того, чтобы выравнять усиление различных частот. В отдельных случаях необходимо бывает строить усилители н. ч. с заведомо неравномерными частотными характеристиками, дающие повышенное или пониженное усиление на некоторых участках полосы пропускания. Так, например, если громкоговоритель не способен достаточно равномерно воспроизводить все частоты, его звучание от усилителя н. ч. с ровной частотной характеристикой не будет достаточно удовлетворительным. Здесь может понадобиться усилитель н. ч., дающий повышенное усиле-

ние на тех частотах, которые громкоговоритель воспроизводит хуже других.

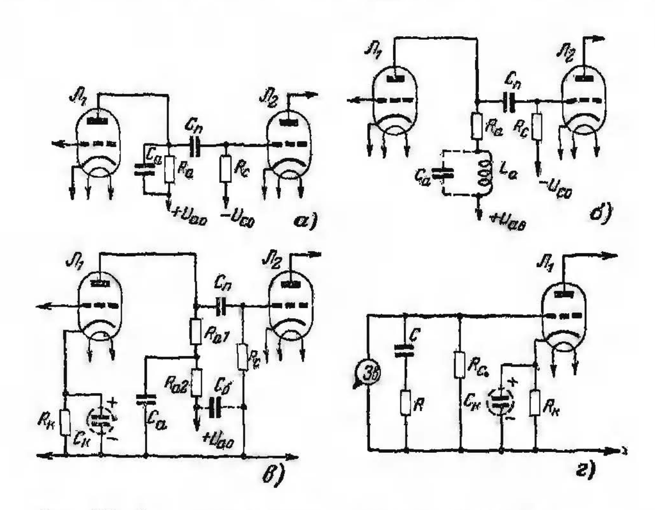
Другой пример. Если до детектора работает усилитель высокой или промежуточной частоты, обладающий очень большой избирательностью и поэтому плохо пропускающий края полос боковых частот радиотелефонной передачи, то после детектирования получится передача с ослабленными верхними звуковыми частотами. В этом случае рационально применить усилитель н. ч., дающий повышенное усиление на верхних частотах звукового диапазона, чтобы в конечном счете эти частоты воспроизводились не хуже более низких.

В усилителях, применяемых для записи на магнитную ленту, как уже говорилось, также нужно иметь большее усиление на верхних частотах.

Простейшие способы частотной коррекции. Рассмотрим наиболее распространенные способы осуществления коррекции частотных характеристик усилителей н. ч. Выше говорилось о необходимости включения корректирующего конденсатора параллельно первичной обмотке выходного трансформатора усилителя н. ч. (см. фиг. 8). Включая подобным же образом конденсаторы параллельно анодным нагрузкам различных ступеней усиления (фиг. 38,*а*), можно получить уменьшение усиления на верхних частотах полосы пропускания. Чем больше будет емкость конденсатора C_a, тем ниже будет верхняя граница полосы пропускания. Уменьшая емкость переходного конденсатора $C_п$, можно ухудшить усиление нижних частот полосы, сократить ее со стороны этих частот. Для увеличения усиления на верхних частотах последовательно с анодным сопротивлением R_a ступени на сопротивлениях можно включить катушку L_a (фиг. 38,*б*) с такой индуктивностью, чтобы она обладала относительно небольшим реактивным сопротивлением для низких и средних, но значительным сопротивлением для верхних частот. При этом на усиление нижних и средних частот она будет оказывать небольшое влияние, но заметно увеличивать его на верхних частотах. Чтобы получить подъем усиления на любой заданной частоте, параллельно катушке можно включить конденсатор C_a такой емкости, чтобы получившийся резонансный контур был бы настроен на эту частоту.

Для того чтобы получить подъем усиления на участке нижних частот полосы пропускания, анодную нагрузку лампы

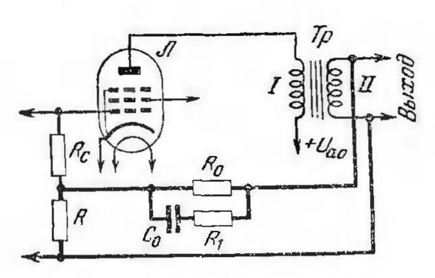
иногда составляют из двух последовательно соединенных сопротивлений R_{a1} и R_{a2} (фиг. 38,*в*), а общую точку этих сопротивлений соединяют с землей через конденсатор C_a. По мере понижения частоты емкостное сопротивление конденсатора C_a увеличивается и его шунтирующее действие по отношению к сопротивлению R_{a2} уменьшается. В результате с понижением частоты общее сопротивление этой сложной анодной нагрузки увеличивается, а вместе с тем возрастает и усиление ступени.



Фиг. 38. Схемы коррекции частотных характеристик.
а—включение конденсатора C_a параллельно анодной нагрузке R_a ступени уменьшает усиление на верхних частотах полосы пропускания; *б*—включение катушки индуктивности L_a последовательно с анодным сопротивлением R_a увеличивает усиление на верхних частотах полосы пропускания; *в*—включение конденсатора C_a создает подъем усиления на нижних частотах; *г*—включение цепочки *CR* параллельно пьезоэлектрическому звукоснимателю *Зв* ослабляет звучание верхних частот и „шумы иглы".

В некоторых случаях частотно-корректирующие элементы включают во входные цепи усилителей н. ч. Так, например, поступают при использовании пьезоэлектрических граммофонных звукоснимателей, которые обычно имеют резонанс на частотах около 6 000—7 000 *гц*. Воспроизведение грамзаписей с помощью таких звукоснимателей неприятно на слух, так как при этом подчеркиваются верхние час-

тоты и сильно заметен «шум иглы». Если же включить в цепь управляющей сетки лампы первой ступени усилителя н. ч. корректирующую цепочку, состоящую из конденсатора *C* и сопротивления *R* (фиг. 38,*г*), тембр звучания грамзаписей становится более приятным для слуха, и «шум иглы» резко ослабляется; такая цепочка сильно шунтирует цепь сетки лампы $Л_1$ в области верхних частот, тем самым значительно ослабляет амплитуды их напряжений, поступающих от звукоснимателя *Зв*, но в то же время очень мало влияет на колебания более низких частот. При $R_c =$ $= 0{,}5$ *мгом* конденсатор *C* должен иметь емкость порядка 5 000 *пф*, а сопротивление *R* — величину порядка 50 000 *ом*. Можно рекомендовать производить подбор корректирующих элементов (сопротивления *R* и конденсатора *C*) применительно к каждому данному образцу звукоснимателя по наиболее приятному тембру звучания.



Фиг. 39. Схема коррекции частотной характеристики способом шунтирования сопротивления R_o в цепи отрицательной обратной связи цепочкой $C_o\,R_1$.

Частотная коррекция с помощью отрицательной обратной связи. Подъем усиления на нижних частотах полосы пропускания может быть также осуществлен с помощью отрицательной обратной связи. Так, например, если уменьшить емкость конденсатора C_o в схеме фиг. 31,*а*, то обратная связь будет действовать только в области верхних частот, а усиление ступени, охваченной связью, на этих частотах будет падать.

Иногда с целью осуществления частотной коррекции в цепь обратной связи вводят новые элементы. Так, если сопротивление R_o (фиг. 39) шунтировать конденсатором C_o и сопротивлением R_1, то на более низких частотах обратная связь будет слабее и соответственно на этих частотах получится большее усиление. Однако при этом на частотах, где обратная связь ослабляется, могут возрасти нелинейные искажения. Поэтому для частотной коррекции лучше применять специальные цепи обратной связи в ступенях предварительного усиления.

14. РЕГУЛИРОВКИ В УСИЛИТЕЛЯХ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Регулятор усиления. На вход усилителя могут поступать различные по амплитуде напряжения н. ч. Так, например, в приемнике без автоматической регулировки усиления при приеме дальних радиостанций напряжения получаются меньше, чем при приеме местных мощных радиостанций. При проигрывании звукоснимателем разных граммофонных пластинок также получаются различные напряжения на входе усилителя, так как одни пластинки записаны «громче», другие «тише». При работе от других источников входного напряжения (например, от звуковоспроизводящей головки магнитофона) имеет место подобное же явление.

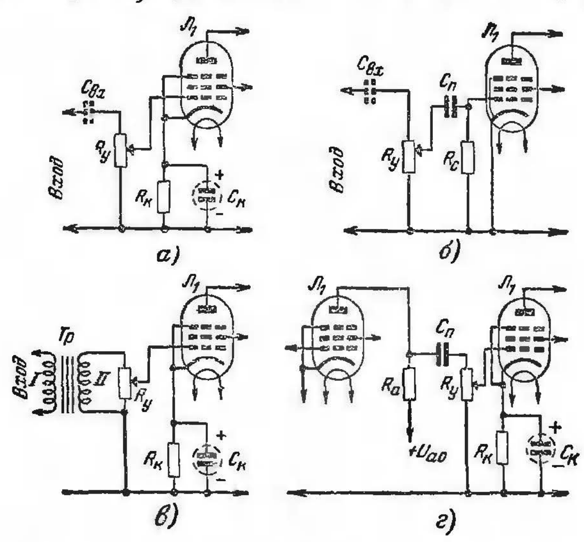
В то же время усиление предварительных ступеней должно быть таким, чтобы в цепи управляющей сетки лампы оконечной ступени получалось переменное напряжение, обеспечивающее отдачу номинальной мощности при самой слабой передаче, поступающей на вход усилителя. Очевидно, что если не принять мер, то при громком приеме или при прослушивании «громких» граммофонных пластинок будет иметь место перегрузка входа и в цепи сетки лампы оконечной ступени при этом условии возникнут напряжения, значительно большие, чем это необходимо для получения максимальной мощности. В результате звучание передачи в громкоговорителе будет чрезмерно громким и со значительными нелинейными искажениями. Чтобы получить нормальную работу громкоговорителя и в этих условиях, а также чтобы иметь возможность по желанию слушать передачу с пониженной громкостью, в схему усилителя добавляется регулятор усиления (регулятор громкости).

В качестве регулятора усиления чаще всего применяется потенциометр R_y с сопротивлением между крайними отводами 0,25—1 *мгом,* включаемый на вход усилителя (фиг. 40,*а* и *б*). На концы этого потенциометра поступает напряжение от приемника, граммофонного звукоснимателя или другого источника входного напряжения. Если усилитель получает входное напряжение от угольного микрофона, с трансляционной (телефонной) линии или от низкоомной звуковоспроизводящей головки магнитофона, то потенциометр регулировки усиления включается параллельно вторичной обмотке *II* входного трансформатора *Тр* (фиг. 40,*в*). Электродинамический микрофон, содержащий в себе транс-

форматор, может включаться на вход усилителя по схемам, изображенным на фиг. 40,*а* и *б*.

Один конец потенциометра $R_у$ соединяется с катодом лампы $Л_1$ первой ступени усилителя (при автоматическом смещении через сопротивление и конденсатор смещения, как показано на фиг. 40,*а*), а движок потенциометра — с управляющей сеткой той же лампы.

Когда сигналы, поступающие на вход, слабы, движок потенциометра $R_у$ устанавливается в самое верхнее (по



Фиг. 40. Схемы включения регуляторов усиления.

а — регулятор на входе усилителя, работающего от детектора, радиоприемника или звукоснимателя; смещение на сетку лампы автоматическое за счет анодного тока; *б* — то же, но смещение подается за счет напряжения входного сигнала; *в* — регулятор на входе усилителя, работающего от звуковоспроизводящей головки магнитофона, от угольного микрофона, с трансляционной линии; *г* — регулятор между ступенями усиления.

схеме) положение и при этом в цепь управляющей сетки лампы $Л_1$ поступает полное входное напряжение. Если же на концах потенциометра будет напряжение больше необходимой величины, движок потенциометра нужно передвинуть несколько вниз. При этом в цепь сетки лампы $Л_1$ поступит только часть входного напряжения н. ч., действующая на участке между его движком и нижним концом. Изменяя положение движка, можно найти такое его место на потенциометре, при котором цепь управляющей сетки лам-

пы $Л_1$ (а следовательно, и лампы оконечной ступени) будет при самой громкой передаче получать напряжение необходимое для отдачи усилителем максимальной мощности независимо от того, насколько напряжение на его входе больше «нормального».

Установка движка потенциометра в радиолюбительских условиях осуществляется «на слух» * в такое положение, при котором передача получается достаточно громкой и без заметных искажений (дребезжаний).

При желании слушать передачу с пониженной громкостью, изменяя положение движка, можно установить такое напряжение в цепи сетки лампы $Л_1$, при котором даже при самых больших амплитудах входного напряжения усилитель будет отдавать на входе мощность ниже максимальной.

В некоторых усилителях потенциометр регулировки громкости R_y включают между ступенями усилителя (фиг. 40,*г*). При этом на него поступает напряжение н. ч., уже усиленное стоящими перед ним ступенями. Величина сопротивления потенциометра регулировки усиления в схеме фиг. 40,*г* должна быть равна величине сопротивления R_{c2} , выбираемой по расчету, приведенному на стр. 72.

Для обеспечения плавного изменения громкости на всем диапазоне регулирования в схемах фиг. 40 обычно применяют потенциометры, сопротивление которых между нижними (по схеме) их концами и движками изменяется по логарифмическому закону.

«Компенсированный» регулятор усиления. В некоторых современных усилителях н. ч., главным образом входящих в состав радиоприемников высших классов, применяются так называемые *компенсированные регуляторы усиления* (громкости), отличающиеся от рассмотренных выше обычных регуляторов усиления тем, что когда с их помощью производится регулирование усиления, то одновременно изменяются и частотные характеристики усилителей н. ч.

Последнее делается по следующим соображениям. Как уже говорилось (см. стр. 22), при уменьшении звуковых давлений чувствительность уха к нижним звуковым частотам существенно понижается; имеет место заметное понижение его чувствительности и в области наиболее высоких звуковых частот (начиная примерно от 4 000—5 000 *гц* и выше). Поэтому при использовании в усилителях н. ч.

---

* В профессиональной аппаратуре установка осуществляется иногда по прибору, носящему название указателя уровня.

радиоприемников обычных регуляторов, которые одинаково изменяют усиление во всей полосе звуковых частот, естественное воспроизведение передачи может быть получено только в тех случаях, когда уровень громкости воспроизведения одинаков с уровнем громкости оригинального исполнения. При слушании же передачи с пониженным уровнем громкости делается заметным ослабление воспроизведения нижних, а также верхних частот звукового диапазона, т. е. передача воспринимается как имеющая частотные искажения.

Применением компенсированного регулятора усиления этот недостаток можно устранить. Поскольку ослабление нижних частот наиболее ощутимо на слух, часто осуществляют компенсацию только на этих частотах. Для этого схему строят так, чтобы при вращении ручки потенциометра регулятора усиления в сторону понижения громкости усиление на нижних частотах снижалось бы меньше, чем на средних частотах звукового диапазона; тем самым естественность воспроизведения передачи практически сохраняется при всех уровнях.

Приведем пример. Максимальный уровень громкости симфонического оркестра составляет 120 *дб*. Слушать передачу с такой большой громкостью в комнате относительно небольших размеров практически невозможно, она будет оглушительной. Предположим, что мы хотим слушать трансляцию передачи этого оркестра с уровнем громкости, сниженным до 50 *дб*. Чтобы и при таком уровне наше ухо восприняло колебания с частотами, например, 100 и 1 000 *гц* с одинаковой громкостью, колебания с частотой в 100 *гц* должны усиливаться примерно в семь раз (на 17 *дб*) больше, чем колебания с частотой 1 000 *гц*. Если же мы захотим слушать ту же передачу с еще меньшей громкостью, например только 30 *дб*, то условие одинаковой громкости звучания будет выполняться, если усиление колебаний с частотой 100 *гц* будет примерно в 22 раза (на 27 *дб*) больше, чем усиление колебаний с частотой 1 000 *гц*.

Наиболее распространенная схема компенсированного регулятора усиления приведена на фиг. 41,*а*. Как видно из этой схемы, такой регулятор отличается от обычного (см. фиг. 40) тем, что параллельно части потенциометра $R_у$ подключена цепочка, состоящая из последовательно соединенных конденсатора C_1 и сопротивления R_1. Точка этого подключения выбирается так, чтобы сопротивление верхней части потенциометра (между верхним концом *1* и отводом *2*)

было в несколько раз больше сопротивления его нижней части (между точками *2* и *3*). Например, в потенциометре, имеющем полное сопротивление 1 *мгом*, сопротивление верхней части может быть 0,8 *мгом*, а сопротивление нижней части 0,2 *мгом*. Для данного частного случая конденсатор C_1 должен иметь емкость 0,05 *мкф* и сопротивление $R_1 = 15\,000$—20 000 *ом*.

Фиг. 41. Схемы „компенсированных" регуляторов усиления.

а — схема с потенциометром, имеющим промежуточный отвод; *б* — схема с потенциометром без промежуточного отвода.

Как известно, полное сопротивление переменному току всякой цепочки, состоящей из последовательно соединенных сопротивления и конденсатора, увеличивается с уменьшением частоты этого тока. Поэтому результирующее сопротивление между точками *2* и *3* схемы для более низких частот также будет больше, чем для частот более высоких. Следовательно, цепочка C_1R_1 может создавать частотную коррекцию.

Однако, когда движок *4* потенциометра R_y находится у точки *1*, т. е. в положении, соответствующем наибольшей громкости, эта цепочка почти не оказывает никакого влияния на форму частотной характеристики усилителя, так как сопротивление участка потенциометра между точками *1* и *2* велико. Если же движок потенциометра переместить в точку *2*, где к нему подключена цепочка C_1R_1, то корректирующее действие последней будет сказываться в полной мере. Вследствие того, что сопротивление между точками *2* и *3* для более низких частот больше, чем для более высоких, напряжение между этими точками с понижением частоты будет повышаться. Поэтому, если к концам потенциометра R_y подвести напряжение разных частот с одинаковыми амплитудами, то при положении движка в точке *2* напряжения более низких частот на управляющей сетке лампы будут иметь большие амплитуды, чем напряжения более высоких звуковых частот. Вследствие этого частотная характеристика усилителя приобретает подъем на нижних частотах звуко-

вого диапазона. При перемещении движка потенциометра в сторону точки *1* корректирующее действие цепочки C_1R_1, а вместе с тем и подъем частотной характеристики в области нижних звуковых частот будут уменьшаться.

Подъем усиления на самых высоких частотах звукового диапазона при уменьшении громкости иногда осуществляют путем включения между верхним концом *1* и движком *4* потенциометра конденсатора небольшой емкости *C* (на фиг. 41,*а* его включение показано пунктиром). Емкость этого конденсатора должна быть тем меньше, чем больше сопротивление потенциометра $R_у$. Практически при сопротивлении между концами последнего, равном 1 *мгом*, конденсатор *C* должен иметь емкость около 2 *пф*. Когда движок потенциометра установлен в самое верхнее положение, соответствующее наибольшей громкости, этот конденсатор замкнут накоротко и поэтому никакого влияния на частотную характеристику усилителя не оказывает. Если же уменьшить уровень громкости, передвигая движок потенциометра вниз, то колебания верхних частот будут проходить на сетку лампы не только через движок потенциометра, но и через конденсатор *C* (колебания средних и самых низких звуковых частот через этот конденсатор практически не пройдут, так как емкость его очень мала). Чем ближе будет движок *4* к точке *3*, тем относительно большие амплитуды верхних звуковых частот будут получаться на управляющей сетке лампы, т. е. по мере уменьшения громкости подъем этих частот будет увеличиваться.

Регулятор усиления, компенсирующий завал в области низких частот, можно выполнить с обычным потенциометром без промежуточного отвода, добавив в схему сопротивления R_1, R_2 и конденсаторы C_1 и C_2 (фиг. 41,*б*). Здесь когда движок *4* потенциометра $R_у$ установлен в положение, соответствующее наибольшей громкости, сопротивления R_1 и R_2 оказываются замкнутыми накоротко конденсатором C_2, и напряжение звуковой частоты с концов потенциометра через этот конденсатор поступает на управляющую сетку лампы. Так как конденсатор C_1 в данном случае включен между сеткой и катодом последовательно с большими сопротивлениями, а емкость его относительно невелика, он оказывает практически ничтожное влияние на форму частотной характеристики усилителя. При перемещении же движка потенциометра вниз на управляющую сетку лампы через конденсатор C_2 поступает регулируемое по амплитуде напряжение с некоторой промежуточной точки потенциометра

и через ячейку $R_1C_1R_2$ — с точки *1* нерегулируемое напряжение.

Очевидно, с понижением частоты сопротивление конденсатора C_1 возрастает (его шунтирующее действие уменьшается); следовательно, напряжение в точке *2*, а значит и на управляющей сетке лампы, увеличивается.

Элементы схемы фиг. 41,*б* подобраны таким образом, что при перемещении движка *4* потенциометра от точки *1* к точке *3* результирующие напряжения более высоких частот на управляющей сетке лампы ослабляются в большей степени, чем результирующие напряжения более низких звуковых частот. Иначе говоря, при снижении уровня громкости воспроизведения передачи подъем нижних частот увеличивается.

Для схемы фиг. 41,*б* можно рекомендовать следующие данные деталей. Если применяется потенциометр R_y сопротивлением 0,5 *мгом*, то сопротивление $R_1 = 1{,}0$ *мгом*, $R_2 = 0{,}25$ *мгом*, конденсатор $C_1 = 500$ *пф* и $C_2 = 3\,000$ *пф*.

Следует подчеркнуть, что компенсированный регулятор усиления имеет смысл применять лишь в тех случаях, когда средний уровень напряжения на входе усилителя н. ч. поддерживается в достаточной мере постоянным и указанный регулятор используется лишь для снижения уровня громкости воспроизведения передачи (это имеет место, например, в приемнике с эффективно действующей автоматической регулировкой усиления по высокой и промежуточной частоте). Если же на вход усилителя могут поступать напряжения с такими большими амплитудами, что регулятором приходится уменьшать усиление с целью установить нормальный уровень на выходе, то делать регулятор усиления компенсированным нет смысла. Наличие регулятора усиления с такими свойствами может привести к тому, что на частотной характеристике усилителя будет получаться подъем нижних частот и в тех случаях, когда такой подъем не нужен. В подобных случаях в усилителе н. ч. лучше иметь обычный регулятор усиления и, кроме того, регулятор тембра, позволяющий устанавливать наивыгоднейшую форму частотной характеристики для любого уровня громкости.

Регуляторы тембра. Часто приходится строить усилители, рассчитанные для работы от источников входного напряжения, обладающих различными частотными характеристиками, а также усилители, предназначенные для громкоговорителей, расположенных в различных помещениях и воспроизводящих передачу с различной громкостью. Мы знаем, что

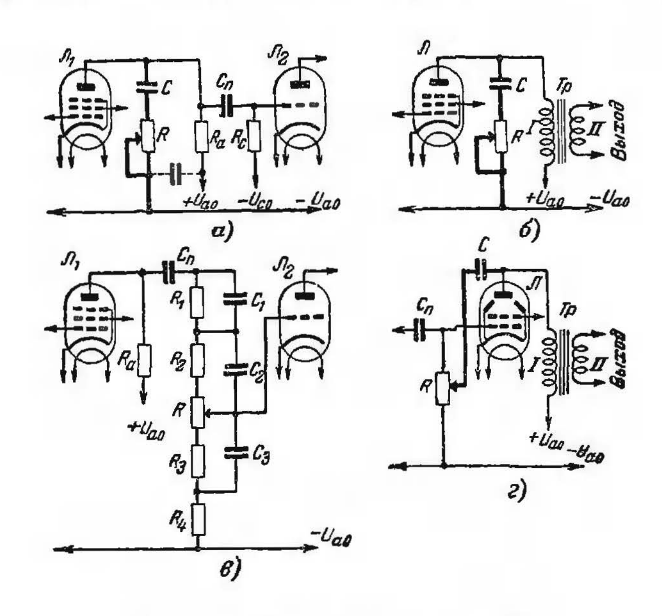
при разных положениях регулятора громкости (некомпенсированного) громкость восприятия ухом различных звуковых частот различна. То же самое происходит при слушании передач в различных помещениях. Если в помещении имеет место сильная реверберация (даже короткий воспроизведенный звук звучит долго), передачу обычно слушать приятнее, когда в ней ослаблены верхние звуковые частоты. Если же, наоборот, помещение сильно заглушает звук (из-за находящейся в помещении мягкой мебели, драпировок, ковров), воспроизведение передачи получается лучше, когда верхние звуковые частоты несколько усилены.

Известно, что при воспроизведении граммофонных записей «шумы иглы» наиболее интенсивны на частотах выше 4 000—5 000 *гц*. Поэтому, если усилитель н. ч. с полосой пропускания до 6 500 — 8 000 *гц* обеспечивает качественное звучание программы, передаваемой, например, через ультракоротковолновые или коротковолновые станции, то при использовании его же для воспроизведения граммофонных записей шумы будут очень заметны. В этом случае ослабление верхних частот звукового диапазона воспринимается слушателем как улучшение качества воспроизведения.

Чтобы во всех случаях обеспечить оптимальные условия восприятия передачи, в усилители вводят специальные устройства, дающие возможность по желанию изменить их частотные характеристики — ослаблять или усиливать одни частоты по сравнению с другими. Такие устройства называются *регуляторами тембра.* Действие их основано на тех же принципах, как и действие схем коррекции частотных характеристик усилителей н. ч.

Наиболее распространенными являются схемы регуляторов тембра, показанные на фиг. 42,*а* и *б*. Такие регуляторы состоят из конденсатора постоянной емкости C и переменного сопротивления R, шунтирующих анодную нагрузку одной из ступеней. Конденсатор C должен иметь емкость порядка тысяч пикофарад, а максимальная величина переменного сопротивления берется в несколько раз больше величины анодного нагрузочного сопротивления. Когда сопротивление регулятора тембра введено полностью, шунтирующая цепочка CR практически почти не влияет на величину и характер анодной нагрузки лампы и усилитель н. ч. имеет нормальную для него частотную характеристику. При уменьшении величины сопротивления R шунтирующее действие цепочки RC на анодную нагрузку увеличивается; так как сопротивление конденсатора C уменьшается с повы-

шением частоты, это действие сказывается сильнее на верхних звуковых частотах. В результате усиление верхних частот полосы пропускания получается тем меньше, чем меньшая часть сопротивления введена в цепь. Соответственно по мере уменьшения действующей части сопротивления R тембр звучания воспроизводимой передачи понижается. Так



Фиг. 42. Схемы регулировки тембра.

а — включение регулятора тембра верхних частот между двумя ступенями усиления; *б* — включение регулятора тембра верхних частот в оконечную ступень; *в* — регулировка тембра нижних частот; *г* — регулировка тембра с помощью переменной отрицательной обратной связи.

как эти регуляторы тембра (фиг. 42,*а* и *б*) обеспечивают изменение усиления в области верхних частот звукового диапазона, их иногда называют «регуляторами тембра в области верхних частот» или сокращенно «регуляторами верхних частот».

В усилителях н. ч. высококачественных радиоприемников и звукоусилительных установок, кроме того, применяют регуляторы, с помощью которых можно изменять усиление в области нижних частот. Одна из схем такого «регулятора нижних частот», включенного между двумя ступенями уси-

ления н. ч., показана на фиг. 42,*в*. Здесь регулировка тембра производится перемещением движка потенциометра R. При одном из крайних положений движка обеспечивается увеличение усиления напряжения частоты 30 *гц* по сравнению с напряжением частотой 1 000 *гц* более чем в два раза (на 7 *дб*), а при другом, крайнем, положении движка достигается уменьшение напряжения частоты 30 *гц* по сравнению с напряжением частотой в 1 000 *гц* примерно в семь раз (на 17 *дб*). Сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 и конденсаторы C_1, C_2, C_3 подобраны в этой схеме таким образом, что пропускание средних и верхних частот звукового диапазона с анода лампы $Л_1$ на сетку лампы $Л_2$ практически не зависит от положения движка потенциометра R. При потенциометре $R = 1$ *мгом* и сопротивлении $R_a = 0{,}1$ *мгом* остальные элементы схемы фиг. 42,*в* должны иметь следующие данные: $R_1 = 0{,}1$ *мгом*, $R_2 = 0{,}3$ *мгом*, $R_3 = R_4 = 50\,000$ *ом*, $C_1 = 120$ *пф*, $C_2 = 1\,500$ *пф* и $C_3 = 3\,900$ *пф*.

Иногда регулировку тембра осуществляют с помощью катушек индуктивности (дросселей), используя то обстоятельство, что их сопротивление изменяется с частотой.

Регулировку тембра можно также осуществлять с помощью переменной отрицательной обратной связи. На фиг. 42,*г* показана одна из схем, в которой этот способ используется для изменения пропускания верхних частот. Здесь постоянное сопротивление цепи сетки лампы заменено потенциометром R, движок которого соединен с анодом лампы через конденсатор C емкостью порядка нескольких сотен пикофарад. Такой конденсатор для верхних частот воспроизводимой полосы обладает значительно меньшим емкостным сопротивлением, чем для средних и нижних частот. Вследствие этого действие отрицательной обратной связи на верхних частотах будет сильнее и она будет ослаблять главным образом усиление этих частот. Наибольшей обратная связь будет тогда, когда движок потенциометра R поставлен в крайнее верхнее по схеме положение. При этом имеет место наибольшее ослабление верхних частот и поэтому получается наиболее низкий тембр звучания. Если же ползунок передвинуть в другое крайнее положение, то нижняя обкладка конденсатора окажется заземленной. В этом случае обратная связь вообще не будет действовать, верхние частоты полосы пропускания будут усиливаться нормально, и тембр звучания будет наиболее высоким. Таким образом, изменяя положение движка потенциометра R, можно изменять тембр звучания.

15. ДВУХПОЛОСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

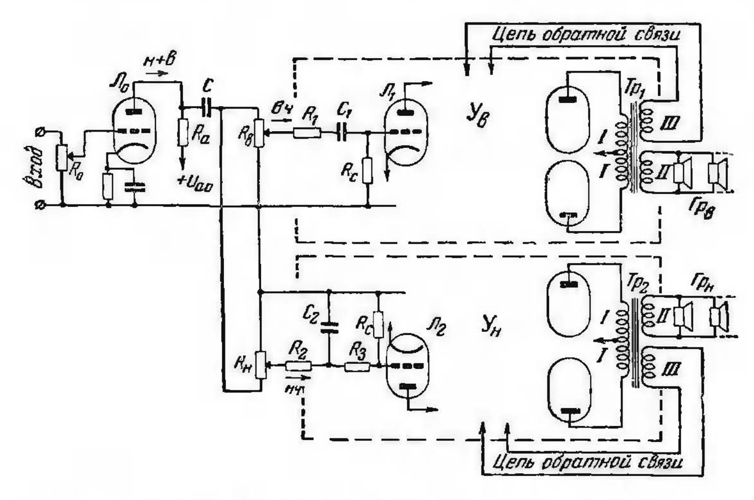
Мы уже говорили, что в громкоговорящих установках высшего класса для воспроизведения нижних и верхних частот применяются отдельные громкоговорители, а на фиг. 27,*а* привели одну из возможных схем включения громкоговорителей на выход усилителя н. ч. такой установки. Однако подобные схемы обладают рядом существенных недостатков. Во-первых, выходное сопротивление усилителя здесь слабо шунтирует громкоговорители, так как от выходного трансформатора их отделяет частотно-разделительное устройство; поэтому при воспроизведении передач сильно сказываются «нестационарные процессы» в громкоговорителях. Во-вторых, вследствие того, что частотно-разделительное устройство содержит индуктивности и емкости, сопротивление нагрузки усилителя имеет реактивную составляющую, т. е. его величина сильно зависит от частоты (по той же причине в частотно-разделительном устройстве возможно возникновение электрических резонансных явлений); это затрудняет получение хорошей частотной характеристики громкоговорящей системы в целом. В-третьих, в частотно-разделительном устройстве бесполезно теряется довольно значительная часть выходной мощности усилителя.

Кроме того, при таком способе разделения частот может возникнуть ряд других нежелательных явлений, преодоление которых представляет существенные трудности.

От всех этих недостатков свободны так называемые *двухполосные* усилительные установки. В них разделение частот на две полосы осуществляется обычно после первой усилительной ступени. Далее «нижние» частоты (например, от 30 до 500—800 *гц*) усиливаются рядом ступеней и подаются на громкоговорители, воспроизводящие эти частоты. В то же время «верхние» частоты (например, от 500—800 до 12 000—15 000 *гц*) после разделения усиливаются другим рядом ступеней, подаются на отдельные громкоговорители и воспроизводятся ими.

Принципиальная схема такого двухполосного усилителя в упрощенном виде дана на фиг. 43 (на схеме показаны не все ступени предварительного усиления). Здесь с помощью потенциометра R_0 регулируется напряжение, подаваемое от источника входного напряжения в цепь управляющей сетки лампы $Л_0$ первой (общей для обоих каналов) ступени, т. е. осуществляется регулировка усиления всех частот. К аноду

лампы $Л_0$ подключены через конденсатор C два потенциометра $R_в$ и $R_н$. Движок потенциометра $R_н$ через цепочку $R_2C_2R_3$ соединен с управляющей сеткой лампы $Л_2$, работающей в первой ступени канала усиления нижних частот $У_н$. Выделение этих частот из общей полосы происходит, во-первых, потому, что цепочка $R_2C_2R_3$ лучше пропускает нижние частоты, чем верхние (конденсатор C_2



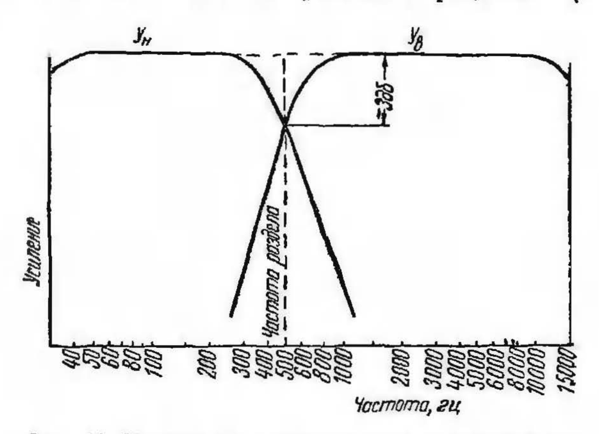
Фиг. 43. Принципиальная схема двухполосного усилительного устройства высшего класса.

включен параллельно), а во-вторых, вследствие того, что первые ступени $У_н$ охвачены цепью отрицательной обратной связи с частотной коррекцией, обеспечивающей резкое уменьшение усиления на частотах выше 500 *гц*. Громкоговорители, воспроизводящие нижние частоты, обозначены здесь буквами $Гр_н$, а выходной трансформатор нижнечастотного канала $Тр_2$.

Рассмотрим теперь канал усиления верхних частот $У_в$. Он начинается с потенциометра $R_в$, движок которого через цепочку C_1R_1 соединен с управляющей сеткой лампы $Л_1$ первой ступени этого канала. Выделение верхних частот из общей полосы достигается, во-первых, потому, что цепочка из последовательно соединенных конденсатора C_1 и сопротивления R_1 лучше пропускает верхние частоты, чем нижние,

а во-вторых вследствие того, что первые ступени $У_в$ охвачены цепью отрицательной обратной связи с частотной коррекцией, обеспечивающей резкое уменьшение усиления на частотах ниже 500 *гц*. Громкоговорители, воспроизводящие верхние частоты, обозначены на схеме фиг. 43 буквами $Гр_в$, а выходной трансформатор верхнечастотного канала $Тр_1$.

Примерные частотные характеристики обоих каналов такого усилительного устройства приведены на фиг. 44. Следует заметить, что на „частоте раздела“ (в данном



Фиг. 44. Частотные характеристики двухполосного усилительного устройства.

случае на частоте 500 *гц*) усиление обоих каналов должно быть одинаковым и в то же время на 3 *дб* (т. е. в $\sqrt{2} = 1{,}41$ раза) меньше, чем усиление каждого из каналов соответственно на более низких и более высоких частотах. Важно также, чтобы усиление канала $У_н$ резко падало на частотах выше частоты раздела, а усиление канала $У_в$ резко падало на частотах ниже частоты раздела. При этих условиях на частоте раздела каждая из групп громкоговорителей $Гр_н$ и $Гр_в$ получает мощность, в два раза меньшую, чем мощность на других воспроизводимых ею частотах. В результате частотная характеристика всего усилительного устройства в целом получается горизонтальной во всем диапазоне воспроизводимых частот. Если же последние условия не выполняются, на частотной характеристике около частоты раздела могут появиться горбы или впадины.

Очевидно, что потенциометр $R_н$ в схеме фиг. 43 играет роль регулятора усиления канала нижних, а потенциометр $R_в$ ту же роль в канале верхних частот. Изменение усиления в одном из каналов по сравнению с усилением в другом канале воспринимается ухом как изменение тембра воспроизводимой передачи.

Следует отметить, что в Советском Союзе впервые в мире были созданы промышленные образцы двухполосных усилительных установок для кинотеатров.

16. ФОН И САМОВОЗБУЖДЕНИЕ В УСИЛИТЕЛЯХ

Допустимые пульсации питающих напряжений. В усилителях н. ч., питаемых от электросетей, принимают ряд мер для снижения фона переменного тока, ухудшающего качество воспроизводимой передачи. Для того чтобы фон, создаваемый пульсациями напряжения, полученного усилителем от питающего его выпрямителя, был достаточно мал, необходимо, чтобы фильтр выпрямителя обеспечивал хорошее сглаживание пульсаций. Практически амплитуда пульсаций анодного напряжения не должна превышать 0,5—1 % величины полезного сигнала, действующего в анодной цепи данной ступени, т. е. уровень напряжения пульсаций должен быть по крайней мере на 40—50 *дб* ниже максимального уровня передачи.

Учитывая, что напряжение фона, возникшее в той или иной предварительной ступени, усиливается последующими ступенями, можно считать, что коэффициент пульсации анодного напряжения питающего первые ступени усилителя н. ч. * не должен превышать величины порядка сотых—тысячных долей процента, в то время как для оконечной ступени, выполненной по обычной (однотактной) схеме на триоде, допустим коэффициент пульсации до 0,1—0,5%.

Такой же коэффициент пульсации можно иметь и для анодного напряжения оконечной ступени с лучевым тетродом или пентодом при условии, что напряжение питающее экранную сетку лампы этой ступени, будет иметь пониженный коэффициент пульсации. Выполнение этого условия необходимо потому, что переменная составляющая напряжения экранной сетки лампы усиливается ею, вследствие чего напряжение фона на выходе усилителя увеличивается.

---

* Коэффициентом пульсации выпрямленного напряжения называется отношение амплитуды его переменной составляющей к постоянной составляющей.

Когда же на экранную сетку и на анод лампы оконечной ступени подаются одинаковые по величине напряжения (экранная сетка соединяется непосредственно с концом первичной обмотки выходного трансформатора, противоположным концу, включенному на анод лампы), тогда пульсация напряжения экранной сетки не должна превышать пульсацию анодного напряжения оконечной ступени.

Можно считать, что в случае применения в усилителях н. ч. пентодов и лучевых тетродов во избежание получения на выходах этих усилителей заметного фона переменного тока нужно на экранные сетки ламп подавать напряжения с пульсациями, примерно в десять раз меньшими, чем допустимые пульсации анодных напряжений тех же ламп.

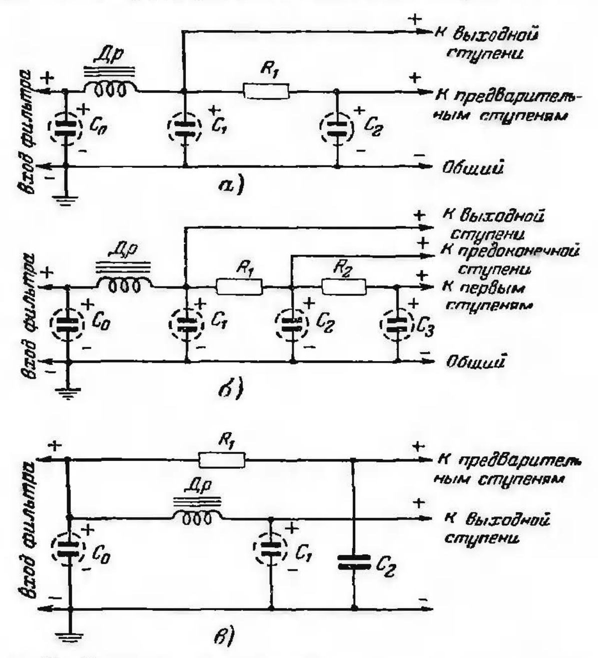
Чем больше усиление, даваемое усилителем, тем лучше должны сглаживаться напряжения, питающие его первые ступени. Даже очень малое напряжение фона, возникшее в первых ступенях усилителя н. ч. с большим усилением, после усиления может оказаться очень большим на выходе. В то же время значительно большее напряжение фона, существующее в анодной цепи оконечной ступени, может почти не проявлять себя, так как оно не подвергается усилению.

Двухтактные ступени усиления предъявляют несколько пониженные требования к сглаживанию пульсаций питающих их напряжений. Как мы знаем, в таких случаях имеет место компенсация фона, создаваемого источниками питания. Поэтому двухтактные ступени можно питать анодными напряжениями с коэффициентами пульсации до 1—3%.

При наличии в усилителе отрицательной обратной связи с вторичной обмотки выходного трансформатора для питания ступеней этого усилителя, охваченных обратной связью, можно применять напряжения с бóльшими пульсациями, чем при отсутствии обратной связи, учитывая, что действием обратной связи фон будет ослаблен.

Применение многоячеечных сглаживающих фильтров. Допуская для своего питания напряжения с повышенным коэффициентом пульсации по сравнению с предварительными ступенями, оконечные ступени в то же время потребляют наибольшую часть тока, отдаваемого выпрямителем усилителю в целом. Это делает целесообразным применение в питающем выпрямителе многоячеечных сглаживающих фильтров (фиг. 45). При этом на оконечную ступень усилителя подают напряжение с выходного конденсатора C_1

первой ячейки фильтра, обеспечивая с ее помощью сглаживание пульсаций, достаточное для оконечной ступени, а на ступени предварительного усиления подают напряжение, сглаженное еще одной-двумя ячейками, снижающими пульсации до величин, допустимых для этих ступеней *.



Фиг. 45. Схемы многоячеечных сглаживающих фильтров.

При таком способе фильтрации питающих напряжений дроссель первой ячейки должен быть рассчитан на полный ток, потребляемый цепями анодов и экранных сеток всех ламп усилителя. Через последующие ячейки сглаживающего фильтра проходят значительно меньшие токи, потребляемые только ступенями предварительного усиления. По этой причине, а также потому, что на аноды ламп предварительных ступеней можно обычно подавать напряжения меньшей величины, чем на оконечную ступень, вторая и последующие

* Если оконечная ступень выполнена по двухтактной схеме, напряжение на аноды ее ламп иногда подают с входного конденсатора фильтра C_0, который в этом случае должен обладать достаточной емкостью, чтобы пульсация напряжения на нем была допустимой для питания такой ступени.

ячейки сглаживающего фильтра в большинстве случаев делаются реостатно-емкостного типа с относительно большими сопротивлениями.

Понижение напряжения на экранные сетки ламп обычно осуществляется включением в их цепи постоянных сопротивлений; при этом между экранной сеткой лампы и корпусом усилителя включается конденсатор постоянной емкости. При соответствующем выборе величины сопротивления и емкости конденсатора образуемая ими ячейка одновременно обеспечивает необходимое уменьшение пульсаций напряжения, подаваемого на экранную сетку, по сравнению с пульсациями питающего напряжения, поступающего на анод той же лампы.

Индуктивные наводки фона. Часто фон переменного тока возникает вследствие влияния внешних переменных магнитных полей рассеяния силового трансформатора и дросселя сглаживающего фильтра на цепи и детали первых ступеней усилителя и на его приемно-усилительные лампы. В установках звукозаписи и звуковоспроизведения фон переменного тока может возникнуть, кроме того, вследствие влияния внешних магнитных полей рассеяния электродвигателей.

Весьма чувствительными к наводкам переменного тока являются входной (например, микрофонный) трансформатор и звукосниматель (особенно электромагнитного типа). Поэтому микрофонный трансформатор нужно тщательно экранировать, а кожух звукоснимателя, если он металлический, обязательно заземлять. Включение звукоснимателя и микрофона на вход усилителя нужно обязательно производить двухжильным экранированным (бронированным) проводом, соединяя его броню с заземленным шасси усилителя в одной точке. Второй конец брони должен быть соединен с корпусом источника входного напряжения звуковой частоты.

Совершенно недопустимо включать источник входного напряжения на вход усилителя неэкранированным, а также одножильным бронированным проводом, используя его броню в качестве второго провода. Дело в том, что внешнее магнитное поле рассеяния силового трансформатора выпрямителя может наводить в броне кабеля переменную э. д. с. Эта э. д. с. действует между входом усилителя и источником входного напряжения, т. е. оказывается включенной последовательно с э. д. с., развиваемой последним. Попадая на вход усилителя, эта паразитная э. д. с. увеличивает уровень фона на его входе. Кроме того, напряжение

фона может возникнуть на концах брони кабеля при наличии утечки или емкости между этой броней и цепями переменного тока, расположенными в самой установке с усилителем н. ч. или рядом с ней. При значительной длине одножильного кабеля, включенного на вход, на входе усилителя может возникнуть весьма сильный фон. Применение двухжильного экранированного кабеля позволяет исключить его броню из входной цепи и тем самым в значительной мере ослабить наводки на вход усилителя.

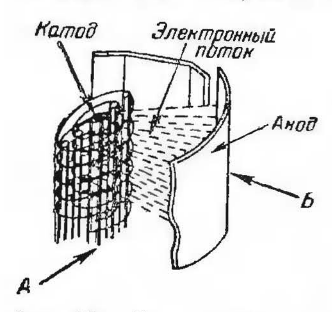
Внешние магнитные поля рассеяния силового трансформатора, дросселя сглаживающего фильтра или электродвигателя в устройствах звукозаписи и звуковоспроизведения могут также создавать фон переменного тока вследствие действия их на электронные лампы. Известно, что магнитное поле способно изменять направление движения электронного потока. От действия магнитного поля количество электронов, достигающих анода усилительной лампы, может уменьшиться.

Если на лампу будет действовать переменное магнитное поле, то ее анодный ток будет изменяться с частотой, с которой изменяется это поле. Особенно опасно это явление для ламп первых ступеней усилителей, дающих большое усиление. При использовании в этих ступенях металлических ламп фон получается меньше, чем при применении аналогичных стеклянных ламп, однако металлические баллоны ламп все же полностью не исключают влияния внешних магнитных полей на электронный поток между электродами. Поэтому лампы первых ступеней не допустимо располагать вблизи (в поле рассеяния) силового трансформатора или граммофонного электродвигателя.

При близком расположении к силовому трансформатору ламп оконечной ступени (обычно это стеклянные лампы) также может возникнуть фон переменного тока на выходе вследствие отклонения электронного потока от действия на него внешнего магнитного поля рассеяния этого трансформатора. Если лучевой тетрод расположен близко к силовому трансформатору, то фон переменного тока получается на выходе наибольшим, когда магнитные силовые линии поля рассеяния силового трансформатора пересекают электронный поток в направлении, показанном на фиг. 46 стрелкой *А*. Если же магнитные силовые линии поля рассеяния будут направлены вдоль электронного потока, т. е. в направлении, показанном стрелкой *Б* на той же фигуре, то фон будет наименьшим. Поэтому если лампу оконечной

ступени приходится устанавливать относительно близко к силовому трансформатору, то перед окончательным укреплением ее панельки следует попробовать поворачивать панельку вокруг ее оси и, слушая или измеряя фон на выходе, найти для панельки такое положение, при котором фон будет наименьшим.

При расположении выпрямителя с силовым трансформатором на общем шасси с усилителем нужно учитывать, что наибольшая напряженность магнитного поля рассеяния силового трансформатора получается вдоль оси его катушки. Поэтому нужно избегать крепить трансформатор в горизонтальном положении. При вертикальном креплении трансформатора ось его катушки будет перпендикулярна к плоскости шасси и влияние поля рассеяния трансформатора на детали в цепи усилителя будет слабее, т. е. вероятность возникновения фона от его действия будет меньше.



Фиг. 46. Если магнитные силовые линии рассеяния силового трансформатора пересекают электронные пучки лучевого тетрода в направлении, показанном стрелкой *А*, фон получается наибольшим; если же эти силовые линии имеют направление, показанное стрелкой *Б*, фон будет наименьшим.

Расстояние между силовым трансформатором и лампами оконечной ступени должно быть не менее 50 *мм*. Лампы ступеней предварительного усиления следует располагать еще дальше от силового трансформатора. Не меньшие расстояния нужно выдерживать и при монтаже электродвигателей в установках для звукозаписи и звуковоспроизведения.

Фон, создаваемый цепями накала. Некоторые радиолюбители считают, что применение в усилителях ламп с подогревными катодами полностью устраняет возможность появления фона за счет цепи накала. Однако это не всегда верно. Если имеется утечка между подогревателем и катодом (или другими электродами лампы), на катоде может возникнуть переменный потенциал, создающий фон. Особенно сильно это явление сказывается в лампах, работающих в первых ступенях усилителей и дающих большое усиление. Такая утечка может существовать как внутри лампы, так и через ламповую панель или через монтаж. Поэтому для

ламп первых ступеней рекомендуется применять панели, изготовленные из высококачественных изоляционных материалов.

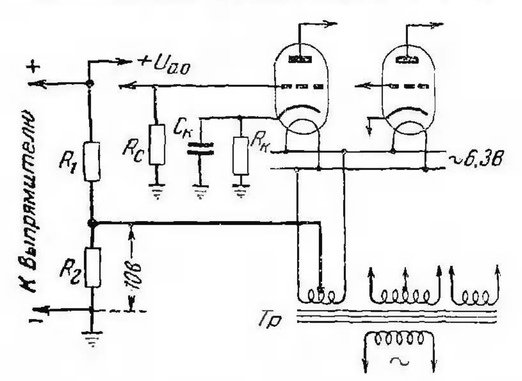
Когда подогреватель (нить накала) соединен с отрицательным полюсом источника анодного напряжения, фон переменного тока может также возникнуть вследствие того, что подогреватель излучает электроны. Эти электроны вместе с электронами, излучаемыми катодом, летят к аноду и к другим электродам лампы, находящимися под положительным потенциалом по отношению к подогревателю. Вследствие того что тепловая инерция подогревателя сравнительно невелика, излучаемый им электронный поток пульсирует в такт с изменениями напряжения накала (с частотой, вдвое большей частоты переменного тока) и, следовательно, в анодной цепи лампы получается пульсирующий ток. Это явление также наиболее опасно в первых ступенях усилителей.

Следует отметить, что возникающий по этой причине фон в ступенях с индивидуальным автоматическим смещением на управляющие сетки обычно бывает тем сильнее, чем больше величина этого смещения, т. е. чем больше напряжение между катодом и подогревателем. Находясь очень близко к подогревателю и обладая положительным потенциалом по отношению к нему, катод довольно сильно притягивает электроны, излучаемые подогревателем. Очевидно, что чем больше положительный потенциал на катоде, чем сильнее электронный поток, создаваемый подогревателем, тем больше фон переменного тока.

Фон, вызываемый подогревателями, можно существенно ослабить, подавая на подогреватели положительный потенциал по отношению к катодам (или отрицательный потенциал на катоды по отношению к подогревателям). Для этого обмотку накала усилительных ламп нужно отсоединить от отрицательного полюса выпрямителя (от шасси усилителя) и присоединить к потенциометру R_1R_2 (фиг. 47), включенному на общий выпрямитель. Величины сопротивлений R_1 и R_2, образующих потенциометр, подбираются таким образом, чтобы на сопротивлении R_2 получалось напряжение порядка 10 *в*. Такое напряжение превышает напряжения смещения, обычно применяемые в ступенях предварительного усиления, т. е. обеспечивает наличие отрицательного потенциала на катодах их ламп по отношению к подогревателям. Действие отрицательных смещений на управляющие сетки ламп при этом не нарушается.

Уменьшение излучения электронов подогревателями ламп ступеней предварительного усиления и тем самым ослабление фона переменного тока на выходе иногда получают путем снижения напряжения накала ламп ступеней до 5,5—5,6 *в* (вместо номинального 6,3 *в*). Существенного снижения усиления при этом не наблюдается, особенно если эти ступени выполнены с большими сопротивлениями в анодных цепях.

Уменьшению фона способствует и заземление средней точки обмотки накала ламп питающего трансформатора.



Фиг. 47. Схема подачи отрицательного потенциала на катод лампы по отношению к ее подогревателю.

В случаях применения в оконечных ступенях ламп прямого накала наличие средней точки у обмотки накала усилительных ламп совершенно обязательно.

Укажем еще ряд мер, позволяющих снизить фон переменного тока. Практика показывает, что при применении в первых ступенях ламп с выводом управляющей сетки наверху баллонов фон получается несколько меньше, чем при использовании одноцокольных ламп (лучше, например, применять в первой ступени пентод 6Ж7, но не пентод 6Ж8). При этом вывод сетки сверху баллона лампы должен быть экранирован стальным колпачком, а проводник, подходящий к сетке, заключен в броню. Экранирующий колпачок припаивается к броне, соединенной с шасси усилителя. Применяя в первой ступени трехэлектродную лампу, можно получить уровень фона в несколько раз (5—7) меньше, чем при работе в этой ступени пентода.

Из соображений снижения фона переменного тока в усилителях с большими коэффициентами усиления не следует использовать металлический корпус (шасси) усилителя в качество проводника. Все «минусовые» цепи схемы сле-

дует монтировать изолированным проводом и соединять их с шасси в одной точке. При этом нужно попробовать делать это соединение поочередно в различных точках и остановиться на том месте, где фон получается наименьшим.

В многоступенчых усилителях, дающих большое усиление, с целью снижения фона накал ламп первых ступеней иногда питают через селеновые выпрямители.

Самовозбуждение усилителей. Выше говорилось, что в усилителях с отрицательной обратной связью иногда возникает самовозбуждение (паразитная генерация) вследствие того, что для разных частот в усилителе получается разный сдвиг фаз и для некоторых частот эта обратная связь может стать положительной.

Однако самовозбуждение может возникнуть и в усилителях (особенно с большим коэффициентом усиления), в которых нет специальной цепи обратной связи, а также в усилителях с отрицательной обратной связью без участия цепи последней. Усилитель может самовозбуждаться потому, что в нем имеется нежелательная (паразитная) положительная обратная связь из анодной цепи лампы какой-либо ступени усиления в цепь сетки одной из ламп, работающих в предыдущих ступенях (редко той же лампы). При этом усилитель работает ненормально, в громкоговорителе появляется звук некоторой постоянной частоты (чаще всего имеющий характер свиста), передача сопровождается искажениями. Если паразитная генерация возникает на частотах выше звуковых, то она хотя и не слышна, но является причиной возникновения нелинейных искажений в передаче.

Во многих случаях причины возникновения такого самовозбуждения очень похожи на причины возникновения фона переменного тока. Так, например, положительная обратная связь, приводящая к самовозбуждению, может возникнуть вследствие воздействия внешнего магнитного поля рассеяния выходного трансформатора или магнитного или электрического поля выходных цепей усилителя на его входные цепи. Помогающее борьбе с фоном переменного тока экранирование входных цепей (в частности, микрофонного трансформатора), рациональное взаимное расположение деталей и правильный монтаж усилителя во многих случаях позволяют избавиться и от самовозбуждения. Например, нельзя в усилителе с большим усилением монтировать оконечную ступень рядом с первыми ступенями, так как такое их взаимное расположение создает благоприятные усло-

вия для возникновения паразитной обратной связи. Соединительные проводники, особенно в первых ступенях, нужно делать возможно короче. Помогает в этом деле и экранирование выходного трансформатора.

Обратная связь через источники питания. Однако даже если при конструировании усилителя н. ч. приняты все необходимые меры, исключающие возможность появления паразитной обратной связи, последняя может возникнуть через общие источники питания ступеней усилителя. Это явление может быть объяснено следующим образом.

Во время работы усилителя анодные токи всех его ступеней изменяются с частотой усиливаемых ими колебаний. Так как источники анодного питания обладают некоторым внутренним сопротивлением, отдаваемые ими напряжения также изменяются. Другими словами, на их зажимах возникают переменные составляющие напряжения. В связи с тем что в наибольших пределах изменяются токи, идущие от источников на последние ступени, величины переменных составляющих на зажимах источников питания определяются главным образом именно этими ступенями. Эти переменные составляющие поступают в анодные цепи ламп предыдущих ступеней и оттуда — в цепи сеток ламп связанных с ними ступеней. Таким образом, получается обратная связь между ступенями. Если внутреннее сопротивление источников питания достаточно велико, то переменные составляющие напряжений, возникающие на них и поступающие как напряжения обратной связи на первые ступени усилителя, могут оказаться настолько значительными, что создадутся условия для самовозбуждения собственных колебаний в ступенях. Самовозбуждение, понятно, возникает в тех случаях, когда эта обратная связь будет положительной.

Следует отметить, что в этих условиях усилители обычно самовозбуждаются и при отсутствии переменного напряжения на их входах. Всякие случайные изменения токов в анодных цепях ступеней ведут к изменениям напряжений на зажимах источников анодного питания и, следовательно, к изменениям напряжений на предыдущих ступенях, которые дают толчок к возникновению собственных колебаний в схеме.

Устранение обратной связи через источники питания. Положительную обратную связь через источник анодного питания удается иногда устранить, шунтировав его конденсатором достаточно большой емкости. Включение такого

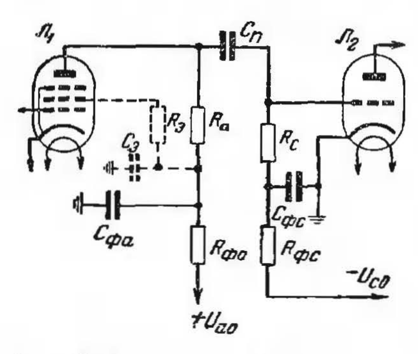
конденсатора, обладающего для токов н. ч. относительно небольшим сопротивлением, уменьшает переменную составляющую напряжения между зажимами источника питания и тем самым ликвидирует обратную связь между ступенями. Таким способом часто удается устранить самовозбуждение в маломощных усилителях, питаемых от сухих батарей, внутреннее сопротивление которых может быть достаточно большим.

Самовозбуждение усилителя н. ч., питаемого от выпрямителя со сглаживающим фильтром, содержащим одну ячейку, иногда может быть устранено увеличением емкости выходного конденсатора этого фильтра.

Применение для питания усилителей н. ч. выпрямителей с многоячеечными сглаживающими фильтрами обычно обеспечивает более устойчивую работу усилителей, делает их менее склонными к самовозбуждению. При таком способе питания анодные цепи различных ступеней оказываются отделенными друг от друга дросселями или сопротивлениями ячеек фильтра, которые препятствуют проникновению переменных составляющих напряжений н. ч. из анодных цепей одних ступеней в анодные цепи других. Так, например, в схемах фиг. 45,*а* и *б* на конденсаторе C_1 образуется переменная составляющая напряжения н. ч. за счет изменений анодного тока оконечной ступени, т. е. имеют место некоторые пульсации питающего напряжения с частотой усиливаемой передачи. Эти пульсации поступают на ступени предварительного усиления через последующие ячейки фильтра, которые уменьшают амплитуду пульсаций с частотой передачи по той же причине, по которой они ослабляют фон переменного тока. Отметим, что в этом отношении схема фиг. 45,*в* дает лучшие результаты, чем схемы фиг. 45,*а* и *б*, так как здесь на пути пульсирующего тока из анодной цепи оконечной ступени в анодные цепи ступеней предварительного усиления стоят и дроссель *Др*, и сопротивление R_1.

Для предотвращения самовозбуждения усилителей н. ч. питание анодной цепи каждой их предварительной ступени часто осуществляют через индивидуальный фильтр, состоящий из сопротивления $R_{фа}$ и конденсатора $C_{фа}$ (фиг. 48). Эти фильтры затрудняют проникновение переменных составляющих напряжений н. ч. из анодных цепей одних ламп в анодные цепи других через источник анодного питания, ослабляя тем самым возможные обратные связи через него и улучшая устойчивость работы усилителя. Такие фильтры

носят название *развязывающих*. Их конденсаторы обычно имеют емкости порядка десятков долей микрофарады (иногда несколько микрофарад), а сопротивления — порядка тысяч или десятков тысяч ом. В некоторых случаях, когда анодный ток ступени довольно велик и недопустимо существенное падение постоянного напряжения на развязывающем фильтре, в нем вместо сопротивления применяют дроссель.



Фиг. 48. Включение развязывающих фильтров.

Нужно отметить, что развязывающие фильтры ступеней усилителей, питаемых от выпрямителей, одновременно являются и сглаживающими фильтрами, т. е. способствуют уменьшению фона переменного тока.

В многоступенных усилителях с большим коэффициентом усиления, в которых смещение на сетки ламп различных ступеней подается от общего источника, с целью предотвращения возникновения обратных связей через этот источник включают также развязывающие фильтры в цепи управляющих сеток ламп, как показано на фиг. 48($R_{фс} C_{фс}$).

В заключение отметим, что иногда в ступенях усилителей н. ч. (особенно в оконечных, значительной мощности) возникает паразитная генерация на очень высоких частотах, соответствующих диапазону ультракоротких волн. Эта генерация может возникнуть в тех случаях, когда междуэлектродные емкости ламп совместно с монтажными проводами, подсоединенными к лампе, образуют колебательные контуры, настроенные на такие частоты, причем имеют место условия для самовозбуждения колебаний в этих контурах. Заранее учесть возможность возникновения такой паразитной генерации практически невозможно. Мерой борьбы с ней является увеличение затухания паразитных контуров ультравысоких частот. Практически это можно сделать, включая последовательно в цепи сеток или анодов ступеней, в которых возникает такая генерация, сопротивления величиной порядка нескольких десятков или сотен ом или же небольшие высокочастотные дроссели.



Цена 3 р. 45 к.